



**Trascolación y escorrentía cortical en la cuenca experimental de San Salvador, Pirineo Central español**

*Throughfall and stemflow in the San Salvador catchment, Central Spanish Pyrenees.*

Serrano-Muela M.P.<sup>(1)</sup>; Regues, D.<sup>(1)</sup>; Estela Nadal-Romero, E.<sup>(2)</sup>

(1) Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Campus de Aula Dei, Apdo. 202. 50192, Zaragoza, España.  
pilism@gmail.com

(2) Dep. Earth and Environmental Sciences, Physical and Regional Geography Research Group, K.U.Leuven. Celestijnenlaan 200 E, P. O. Box 3001, Heverlee, Belgica.

**Resumen**

Se ha estudiado la trascolación y la escorrentía cortical en un bosque del Pirineo central. La cuenca de San Salvador (0,92 km<sup>2</sup>) se localiza en el Valle de Aísa, donde la masa forestal se encuentra en expansión, debido al abandono de actividades agrícolas desde mediados del siglo XX. La cuenca presenta una densa cubierta vegetal (más del 90%) asociada a tres especies arbóreas (Pino, Haya y Quejigo) y una de matorral (*Buxus sempervirens*), en las que se han estudiado los procesos de trascolación y escorrentía cortical. Los resultados señalan que lluvia que alcanza el suelo depende de: el tipo de cubierta arbórea, el porcentaje de cobertura del suelo y las características de la lluvia. Se ha observado mayor interceptación bajo *Fagus sylvatica* que bajo *Quercus gr. faginea* o *Pinus sylvestris*, si bien éstas últimas muestran un comportamiento estacional menos contrastado, especialmente el Pino por ser una especie perennifolia.

**Palabras clave:** trascolación, escorrentía cortical, *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Quercus gr. faginea*, Pirineo Central.

**Abstract**

Throughfall and stemflow have been studied in a forest-covered catchment in the Central Spanish Pyrenees. The San Salvador catchment (0,92 km<sup>2</sup>) is located in the Aísa Valley, in which trends in plant cover evolution show an increase of the presence of open and dense forests, after the abandonment of agricultural activities since the middle of the 20th Century. San Salvador catchment shows a dense forest in all area



(more than 90%). *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica* and *Quercus gr. faginea*, forest patches alternate in the catchment according to altitude and shape of the slopes (concave, convex). Three open plots have been selected in the San Salvador catchment, corresponding to the three types of forest cover. The results (April 2006-April 2008) has demonstrated that the percentages of throughfall are associated with type of forest cover, due to differences in the morphology of the leaves and the foliage density. Thus, the species that causes a major interception is *Fagus sylvatica*, while *Quercus gr. faginea* and *Pinus sylvestris* has shown a similar enough seasonal behaviour, the last one more homogenous due to the invariable coverage.

**Key words:** interception, throughfall, stemflow, *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Quercus gr. faginea*, Central Pyrenees.

## 1. Introducción

Desde que Horton (1919) publicara su trabajo sobre la interceptación de la lluvia por los bosques, ha habido un importante número de estudios que demuestran que la interceptación es uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico (Zinke, 1967; Calder, 1979; Bosch y Hewlett, 1982; Whitehead y Robinson, 1993; Whelan y Anderson, 1996). En todos ellos, se ha destacado el papel de la cubierta forestal en el ciclo hidrológico ya que influye de manera decisiva en la cantidad de agua que alcanza el suelo.

Algunos autores (Bellot y Escarré, 1991) han considerado la cubierta vegetal como un filtro poroso hecho de hojas y ramas que actúa como un embudo, ya que canaliza el agua de la cubierta y la deposita en el suelo, bajo los árboles o alrededor de los troncos de los árboles. Es por ello que, en función del tipo de especie y de la estructura de cada una, habrá diferentes filtros, o lo que es lo mismo, según el tipo de árbol, la interceptación es de una manera o de otra (Anderson *et al.*, 1976; Loshali y Singh, 1992; Dietz *et al.*, 2006). Como resultado de la interceptación, se produce una redistribución de la precipitación (Keim *et al.*, 2005), que afecta a diferentes niveles, como la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos forestales (Gesper y Holowaychuck, 1970 y 1971; Durocher, 1990), o la humedad y la química del suelo (Herwitz, 1988), o incluso en la hi-

drología a escala local o de una cuenca (Zirlewagen y Von Wilpert, 2001; Llorens y Domingo, 2007) y, sobre todo cuando se trata de una cuenca forestal (Sopper y Lull, 1967; Bruijnzeel, 2001).

Numerosos trabajos han puesto de relieve la gran influencia que ejerce la cubierta vegetal sobre la respuesta hidrológica, a través de estudios en ambientes afectados por incendios, repoblaciones o talas masivas (Hibbert, 1967; Lull y Reinhart, 1967; Bosch y Hewlett, 1982; Trimble *et al.*, 1987; Sahin y Hall, 1996; Stednick, 1996; Andréassian, 2004; Brown *et al.*, 2005). En todos los casos se ha puesto de manifiesto que la reducción de superficie forestal, en favor de pastos, aumenta la frecuencia y la magnitud de las crecidas, mientras que el aumento de la superficie del bosque reduce la escorrentía (García-Ruiz *et al.*, 2008).

El abandono y la subutilización de las laderas, en extensas zonas de la montaña media del Pirineo central, han implicado cambios muy intensos en la cubierta vegetal y en el paisaje como consecuencia del proceso de revegetación (Molinillo *et al.*, 1997; Vicente-Serrano *et al.*, 2006). Lasanta (1988) señaló que tres cuartas partes de los campos cultivados a principio del siglo XX dejaron de trabajarse a partir de los años 40 del mismo siglo, disminuyendo de forma drástica la presión humana y también la ganadera (García-Ruiz y Balcells, 1978). Como resultado se han transformado amplias áreas de campos de cultivo

y pastizales que se han convertido en un dominio generalizado de bosques y matorrales de sucesión (Gallart y Llorens, 2003; Poyatos *et al.*, 2003; Vicente-Serrano *et al.*, 2004).

Los cambios de la cubierta vegetal pueden desencadenar importantes cambios hidrológicos (Gallart *et al.*, 1997). En este sentido, algunos estudios han demostrado fuertes variaciones de la respuesta hidrológica asociados a las características y distribución de la vegetación (perennifolia y caducifolia), e incluso a la presencia o ausencia del follaje en bosques caducifolios (Reynold y Henderson, 1967; Cape *et al.*, 1991; Jones y Post, 2004). En segundo lugar, porque precisamente en los espacios mediterráneos el agua ha sido siempre un limitante fundamentalmente por la marcada estacionalidad de su régimen climático (Bellot y Escarré, 1991; Gallart y Llorens, 2003).

Sin embargo, la mayor parte de los trabajos sobre esta temática han sido desarrollados en bosques de áreas templadas más septentrionales, con la particular diferencia de que las tasas de evaporación son mucho más bajas que en los espacios mediterráneos. De esta forma, han sido varios los trabajos que se han desarrollado en los últimos años en la Península Ibérica en diversos ambientes y tipos de cubierta vegetal. Sirvan como ejemplo los estudios realizados en espacios adeshados bajo encina –*Quercus rotundifolia*– (Mateos y Schnabel, 2001; Mateos, 2003), en los cuales además de estudiar la interceptación se tuvo en cuenta su variabilidad espacial; en bosques del Sistema Central, con la especie *Quercus pyrenaica*, donde se tuvieron en cuenta distintos estados de madurez del bosque y densidad del mismo (Morán-Tejeda *et al.*, 2008); en la Sierra del Moncayo (Ibarra y Echeverría, 2004), donde se compararon simultáneamente tres especies arbóreas (*Quercus Pyrenaica*, *Pinus sylvestris* y *Fagus Sylvatica*) a lo largo de un gradiente climático, o bajo condiciones de montaña media como el área de estudio de este trabajo, en el Pirineo Oriental, bajo cubierta de *Pinus sylvestris* (Llorens *et al.* 1997).

Por otro lado, existen importantes implicaciones geomorfológicas asociadas a la interceptación y están relacionados con el destacado papel de la cubierta forestal en la regulación de la capacidad erosiva de la lluvia. En este sentido, Wischmeier y Smith (1958) demostraron que la energía cinética es el factor más importante de una tormenta, de ahí que cuando la precipitación llega al suelo, ya sea en forma de trascolación o de escorrentía cortical, gran parte de su energía cinética se ha disipado. Esto también produce algunos efectos de carácter hidrológico, aunque no han sido objeto de estudio en este trabajo, pues se relacionan principalmente con suelos más desprotegidos.

El Instituto Pirenaico de Ecología investiga desde hace más de una década, a través de un conjunto de cuencas experimentales, las relaciones entre usos del suelo y tipo cubierta vegetal sobre las respuestas hidrológica y del sedimento en el Pirineo Central (Beguería *et al.*, 2003; García-Ruiz *et al.*, 2005 y 2008; Serrano-Muela, 2008a; Nadal-Romero, 2008; Lana-Renault, 2007). La cuenca de San Salvador presenta más del 90% de su superficie con cubierta forestal, y se monitorizó entre mediados de 2006 y mediados de 2008 para el estudio de procesos de interceptación (Serrano-Muela *et al.*, 2008b).

Este trabajo presenta el análisis de los procesos de partición de lluvia que afectan a la cuenca de San Salvador. Los objetivos principales han sido: (1) cuantificar la precipitación incidente que llega al suelo en forma de trascolación y escorrentía cortical bajo tres tipos de cubierta vegetal (pino, haya y quejigo), diferenciando el comportamiento entre la cubierta de coníferas (perennifolias) y frondosas (caducifolias y marcescentes) y teniendo en cuenta el cambio fenológico estacional de las especies estudiadas; (2) valorar la importancia de la presencia de la cubierta de matorral de boj (*Buxus sempervirens*) en la cantidad de agua que llega al suelo; (3) analizar la influencia de las características de las precipitaciones en los procesos de la partición de la lluvia.

## 2. Características del área de estudio

La cuenca experimental de San Salvador (92 ha) se encuentra en la margen izquierda del valle de Aísa (Pirineo Central) y constituye uno de los barrancos tributarios del río Estarrún, que es afluente del río Aragón (Fig. 1). Por otro lado, esta cuenca se sitúa en un ambiente de montaña media y está constituida por dos vertientes muy regularizadas con orientaciones muy marcadas hacia norte y sur. La cota mínima está a 830 m y la más alta a 1295 m de altitud. La pendiente media en solana es del 24% mientras que en umbría es

del 26%. El substrato está formado por turbiditas de la facies Flysch de edad Eocena, la cual se caracteriza por una alternancia de estratos blandos, de textura limo-arcillosa, y duros, de textura franco-gravosa, con una composición dominada por minerales carbonatados y, en menor porcentaje, silicatos.

El clima de la zona de estudio ha sido considerado de transición, con características propias de clima húmedo y de clima mediterráneo con cierto carácter continental (Puigdefábregas y Creus, 1976; Creus, 1983). La temperatura media anual (10°C), presentando una impor-

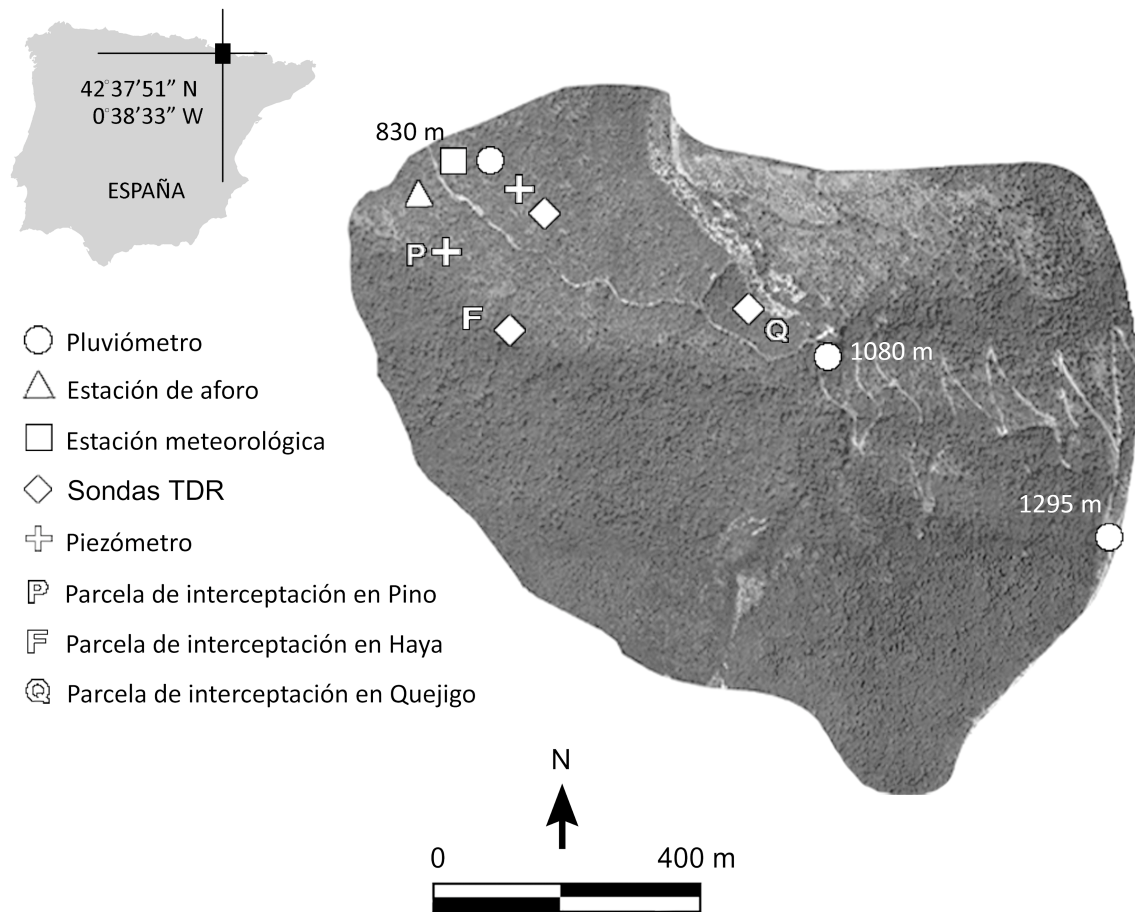


Figura 1. Localización de la Cuenca experimental de San Salvador en el contexto español y dispositivo instrumental: parcelas para el estudio de la partición de lluvia y otro equipamiento instalado.

Figure 1. Location of San Salvador experimental plot within the Spanish context and instrumental devices: plots for the study of the rainfall partition and other equipments installed.

tante amplitud térmica entre verano e invierno (entre -15°C y 35°C). La precipitación media anual es aproximadamente de 1100 mm, y se reparte fundamentalmente entre primavera y otoño, mientras en invierno suelen darse nevadas y en verano son frecuentes las tormentas convectivas. Destaca durante el verano un marcado déficit hidrológico, que se debe más a la evapotranspiración que al volumen de precipitaciones.

La vegetación en la cuenca de estudio es representativa de toda la franja latitudinal y altitudinal de las sierras del Sector del Flysch. A pesar de las intensas transformaciones que ha sufrido el Pirineo por la actividad agrícola y ganadera, algunos sectores, como es el caso de la cuenca de San Salvador, han permanecido hasta hoy con pocas perturbaciones y en buenas condiciones de conservación.

Debido a la disposición orográfica de la gran mayoría de los barrancos del Sector del Flysch (NW-SE) y consecuentemente a la orientación de sus laderas (norte y sur), la distribución de la vegetación presenta diferencias importantes según la vertiente. En la umbría la especie dominante es el pino silvestre (*Pinus sylvestris*), que aparece muy mezclada con bosquetes de haya (*Fagus sylvatica*) y otras especies frondosas en las zonas más cóncavas y húmedas. En la solana, el pino silvestre se mezcla con una de las especies más características y abundantes de estas zonas de transición climática, el quejigo (*Quercus gr. faginea*) (Montserrat, 1971).

En toda la cuenca destaca la presencia de un sotobosque y muy denso. Está formado mayoritariamente por boj (*Buxus sempervirens*), una de las especies más características de estas zonas de transición climática. En umbría su densidad es mayor y en solana aparece junto a otras especies espinosas mediterráneas de porte bajo, como la aliaga (*Genista scorpius*) o el enebro (*Juniperus communis*). Los suelos del área de estudio son de tipo forestal, por lo que están muy desarrollados y estructurados. Generalmente son más pro-

fundos en umbría que en solana, donde presentan mayor heterogeneidad. De esta manera, el tipo de suelo más frecuente en umbría es el Phaeozem o el Kastanozem, mientras que en solana, además de este último tipo, se encuentran Cambisoles o Regosoles.

### 3. Metodología

#### 3.1. Precipitación, trascolación y escorrentía cortical

En 2006 la cuenca de San Salvador fue equipada con tres parcelas para el control de la interceptación, bajo cada una de las cubiertas arbóreas predominantes (*Pinus*, *Fagus* y *Quercus*). Las parcelas bajo pino y haya se encuentran en exposición umbría y la parcela bajo quejigo en la vertiente solana.

Para poder estudiar el efecto del matorral (*Buxus sempervirens*) en el proceso de la interceptación, la parcela bajo cubierta de haya se dividió en dos sectores. En el primero se estudió la interceptación solamente bajo cubierta de haya, para ello se eliminó la cubierta de matorral en una parte de la parcela, mientras en el segundo sector se pudo analizar la interceptación causada por las cubiertas arbórea y arbustiva. Ambos estudios se llevaron a cabo de forma simultánea, lo que permitió establecer comparaciones sobre el efecto de la cubierta de matorral en el proceso de interceptación.

De esta manera, la parcela de haya (15 m<sup>2</sup>) está monitorizada mediante 10 pluviómetros totalizadores bajo cubierta arbórea y 14 bajo cubierta arbórea y arbustiva; la parcela de pino (16 m<sup>2</sup>) está equipada con 24 pluviómetros totalizadores y la de quejigo (16 m<sup>2</sup>) cuenta con 25 (Fig. 2). Los pluviómetros totalizadores se disponen en forma de malla regular, estando cada pluviómetro a una distancia de 1 metro del contiguo. Asimismo, cada parcela dispone de un pluviómetro automático que proporciona un registro deta-

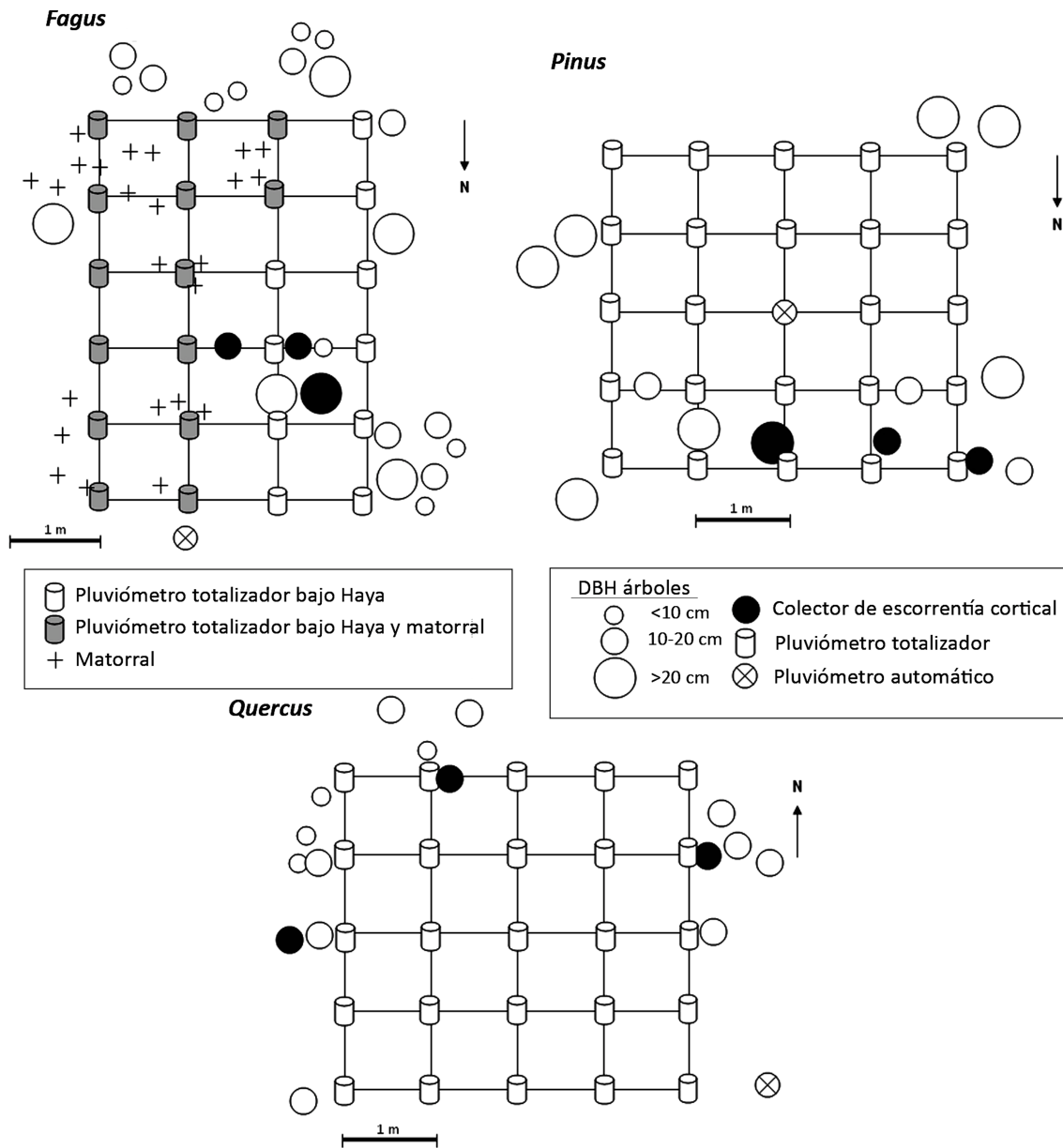


Figura 2. Diseño de las tres parcelas experimentales.  
 Figure 2. Design of the three experimental plots.

llado de cada evento de lluvia dentro de bosque. Por otro lado, en cada una de las parcelas se instalaron tres anillos-colectores para recoger la escorrentía cortical. Las características de cada parcela (situación, densidad arbórea, DBH (*Diameter at breast height*),

altura, área basal y porcentaje de cubrimiento) se detallan en la Tabla 1.

Además, la cuenca cuenta con tres pluviómetros automáticos ubicados a distintas altitudes (830, 1080, 1295 m) que quedan fuera de

Tabla 1. Características de las parcelas experimentales.  
 Table 1. Characteristics of the experimental plots.

	Pino	Haya	Quejigo
Área de la parcela (m <sup>2</sup> )	25	24	25
Altitud (m)	892	895	1040
Orientación	N	N	S
Densidad (Pies ha <sup>-1</sup> )	1900	3500	2500
DBH medio (cm)	22,72	12,67	11,85
Altura media de los árboles (m)	15-18	14-17	7-8
Área basal (m <sup>2</sup> )	0,45	0,15	0,12
Grado de cobertura verano (%)	54,13*	94,37	73,11
Grado de cobertura invierno (%)	54,13*	48,64	20,11

\* cobertura constante a lo largo del año.

toda cubierta arbórea para el registro de la precipitación real, uno en la parte más baja y más cerca de las dos parcelas de umbría (*Pinus* y *Fagus*), un segundo pluviómetro en la parte media, cerca de la parcela de solana (*Quercus*) y un tercero en la divisoria.

El efecto de la disposición espacial de los colectores para la medición de la interceptación es algo que todavía no está muy definido (Neal *et al.*, 1990). En la literatura científica se encuentran estrategias diversas sobre estos trabajos experimentales: mallas rectangulares, mallas radiales, a lo largo de una línea variable o posiciones al azar cambiantes. Carlyle-Moses *et al.*, (2004) recomiendan un diseño de muestreo aleatorio al no haber encontrado un componente sistémico en la variabilidad de la precipitación. Sin embargo, para estudios llevados a cabo durante un periodo largo, como el que aquí se presenta, se recomienda mantener los colectores en posiciones fijas (Davie, 2002).

El análisis de los datos adquiridos en las distintas cubiertas arbóreas se han estudiado de la siguiente manera: 1) el haya, como especie frondosa caducifolia se ha estudiado en dos periodos, uno correspondiente al periodo vegetativo en el que tienen hojas (también llamado verano en este trabajo) y otro

correspondiente al periodo vegetativo en el que se han desprendido de hojas (también llamado invierno); 2) el quejigo, a pesar de ser especie arbórea marcescente (lo que significa que, tras haber finalizado el periodo vegetativo, las hojas pueden permanecer en el árbol durante toda la estación fría hasta prácticamente la salida de las nuevas hojas en la siguiente primavera) se ha tratado de la misma forma que el haya, dividiendo los eventos en invierno y verano. Para diferenciar estos dos periodos se ha seguido un criterio estrictamente fenológico. La etapa “con hojas” se corresponde con el periodo durante el cual los árboles tienen hojas y están vivas, mientras que el periodo “sin hojas” se ha considerado cuando las hayas especialmente –pues los quejigos pueden conservar sus hojas hasta la salida de las nuevas– tiran sus hojas. El periodo con hojas es más largo, normalmente desde finales de marzo hasta octubre, siendo variables sus límites, debido a las variaciones anuales. Finalmente, 3) el pino se ha tratado como especie perennifolia que es, es decir, para el cálculo de los porcentajes de trascolación y escorrentía cortical no se ha hecho distinción entre distintos periodos del año como sí se ha hecho con las otras especies sino que se ha estudiado el año completo. Si bien, en la figura 3 se han separado estos eventos por estaciones para poder comparar las diferencias de comportamiento en las distintas cubiertas.

En este trabajo se han incluido los eventos de lluvia del muestreo realizado entre abril de 2006 y abril de 2008. Bajo cubierta de haya se han estudiado 57 eventos, distinguiéndose 12 en invierno y 45 en verano. Bajo pino se han analizado 51, y bajo cubierta de quejigo 46, 13 en invierno y 32 en verano.

Se entiende por registro de precipitación el total de la lluvia caída desde el inicio de la misma hasta el momento en el que se produce la recogida del volumen total. Un episodio de lluvia es aquella lluvia más o menos continua en el tiempo y separada de la siguiente por un periodo seco. En relación a la

duración del tiempo de estos periodos secos que separan periodos de lluvia, existe una larga discusión sobre cuanto es el tiempo que debe transcurrir para que sean considerados dos distintos. No hay ningún criterio estándar al respecto, pues depende en gran medida del clima y de los procesos naturales que afectan a las precipitaciones pero si algunos autores han fijado este tiempo en 1 hora (Larson, 2003), 4 horas (Rodrigo y Ávila, 2001) o las 12 de Belmonte y Romero, (1999). En este trabajo se han considerado adecuadas 12 horas desde una lluvia a la siguiente.

Por otro lado, la escorrentía cortical empezó a medirse en julio de 2006. Se seleccionaron árboles con medidas de DBH diversas buscando una representación de varios grosores de árbol, para analizar si este parámetro guarda relación con la escorrentía cortical. Los diámetros de los troncos de los árboles considerados son de 22, 19 y 16 centímetros en el caso del pino, 21, 18 y 12 centímetros en el haya, y 21, 18 y 12 centímetros en el quejigo. En la parcela de pino se recogieron 12 eventos, en la de haya 28, y en la parcela de quejigo mientras estuvieron en funcionamiento no se registró ningún volumen de escorrentía cortical, por lo que fueron considerados como valor cero.

### *3.2. Fracción de cubierta del suelo*

El porcentaje de cobertura del suelo en cada parcela se obtuvo a partir de la estimación del cubrimiento sobre cada pluviómetro. Asimismo, se tuvieron en cuenta las distintas condiciones asociadas a los cambios estacionales (verano e invierno principalmente). Las fotografías fueron tomadas con una cámara digital Nikon CoolPix 4500 y un objetivo ojo de pez AF DX de Nikon 10.5 mm f/2.8G ED.

Para el tratamiento de las fotografías hemisféricas obtenidas se utilizó el software GLA (Gap Light Analyzer, [www.rem.sfu.ca/forestry/downloads/gap\\_light\\_analyzer.htm](http://www.rem.sfu.ca/forestry/downloads/gap_light_analyzer.htm), Frazer *et al.*, 1997 y 1999). El tratamiento de la imagen consistió en: a) la estimación de la

región de la imagen a considerar, que en este trabajo fue una circunferencia equivalente al ángulo cenital de 6,66°. En trabajos precedentes Wagner (1998) asume un valor de 7,3° y Llorens y Gallart (2000) un valor de 7,5°; y b) la determinación de la fracción de la cobertura de la cubierta en cada imagen, teniendo especial cuidado en la transformación de los valores de la imagen en escala de grises (Olsson *et al.*, 1982) asignándole valores de 0, a aquellos niveles de gris que correspondiesen con cielo abierto, y valores de 1, a aquellos niveles de gris que correspondiesen con píxeles cubiertos totalmente por vegetación (hojas, ramas y troncos). En este sentido, este método asume que el valor de gris, entre los valores 0 y 1 es una medida de la proporción de brillo (Wagner, 1998). Además se compensó el exceso de luz de algunas zonas de las hojas o el tronco, sobre todo en el caso de las hayas, cuyo color es blanco. Para esto no se aplicaron las fórmulas propuestas por Wagner (1998) sino que se realizaron los retoques manualmente con Adobe PhotoShop, porque se consideró que era el procedimiento más adecuado para la corrección de las imágenes.

### *3.3. Tratamiento de los datos*

Uno de los inconvenientes más habituales en este tipo de estudios es diferenciar los porcentajes de precipitación trascolada tras varios eventos encadenados, en este caso se han utilizado los registros de los pluviómetros automáticos que hay en cada una de las parcelas, que han permitido discriminar los porcentajes de trascolación asociados a cada evento y calcular unos coeficientes ponderados que permitieron estimar los volúmenes aproximados trascolados en cada punto de registro.

La información resultante se ha tratado estadísticamente con el programa SPSS y los gráficos se han realizado con Sigmaplot. Se llevaron a cabo análisis de correlación entre dos variables, y se realizó un análisis de la varianza.



Por otro lado, no se ha podido registrar un número significativo de eventos (entre 40 y 50 aproximadamente) por causas diversas: el desbordamiento de la capacidad de los pluviómetros totalizadores, la congelación y rotura de los recipientes durante los meses más fríos, y, especialmente, la dificultad para acceder a las parcelas de muestreo tras even-

tos de gran magnitud. Asimismo, durante los periodos de transición entre la estación con hojas y la de sin hojas no se han considerado válidos los eventos debido a que la cobertura vegetal es cambiante, esperándose a que los árboles de hoja caduca estuvieran totalmente desprovistos de hojas en invierno y al contrario en primavera.

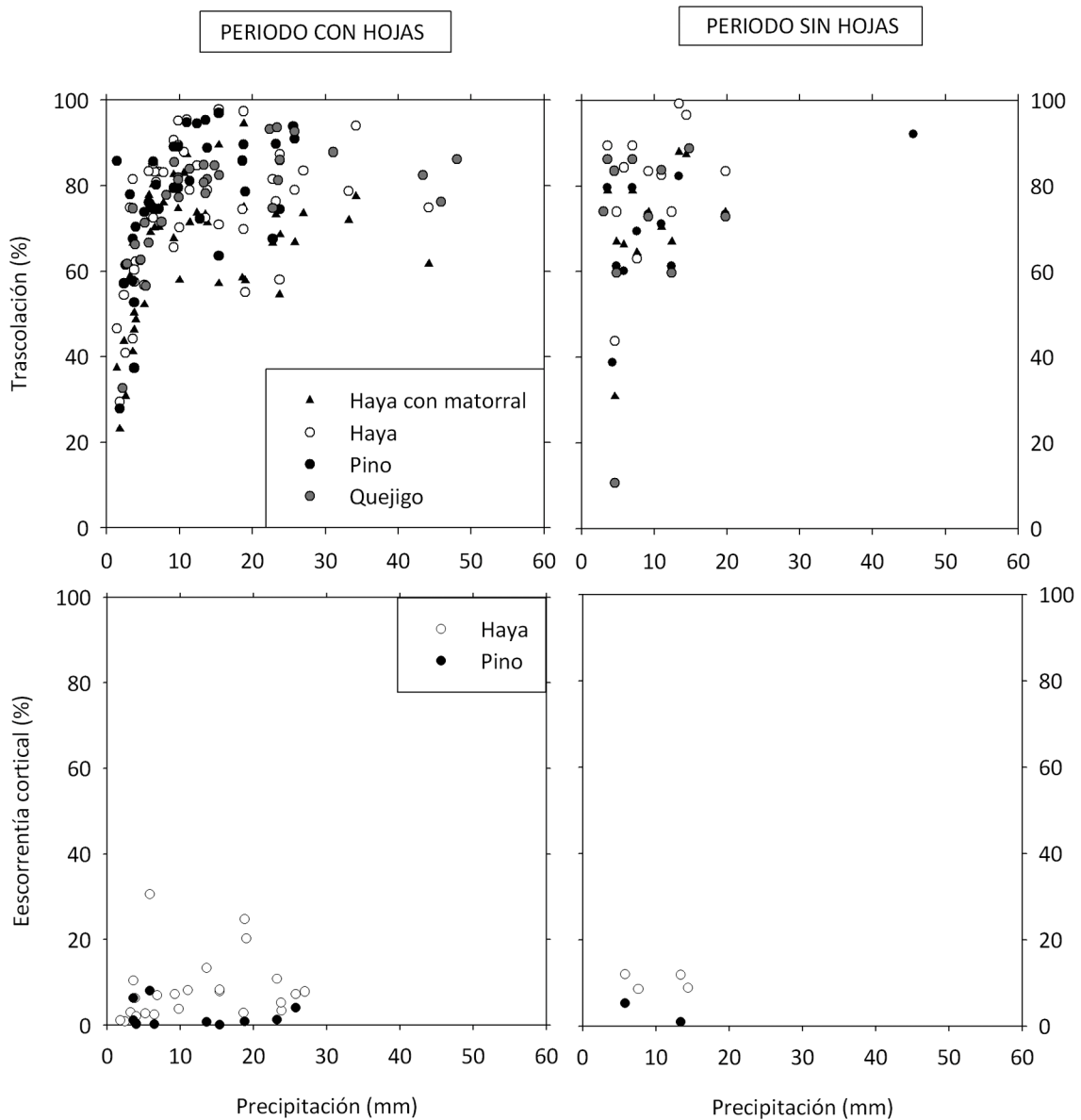


Figura 3. Trascolación y escurrentía cortical en cada una de las cubiertas estudiadas.  
 Figure 3. Throughfall and stemflow in each forest cover studied in this work.

#### **4. Resultados**

El análisis de los resultados se ha iniciado con un estudio de la variabilidad de la trascolación en relación a la cubierta arbórea, para obtener una idea general de la dinámica del proceso en cada una de las condiciones del estudio.

##### *4.1. Precipitación total, trascolación y escorrentía cortical*

Durante el periodo de estudio se han registrado cantidades de precipitación que estadísticamente se consideran de recurrencia anual en esta zona del Pirineo Central (Nadal-Romero, 2008). La precipitación máxima registrada en un evento ha sido de 48,8 mm, y la mínima que ha generado trascolación ha sido de 1,4 mm. El evento de mayor duración ha sido de 22 horas, mientras que el más corto apenas ha durado media hora.

En la figura 3 se muestra la relación de la trascolación y la escorrentía cortical para cada uno de los eventos considerados y bajo cada cubierta.

##### *4.1.1. Trascolación y escorrentía cortical en la parcela de pino*

La trascolación total acumulada bajo pino durante años los dos años de muestreo ha sido 522,54 mm, un 75% del total de la precipitación total registrada en 51 eventos. El rango de valores de trascolación a escala de evento oscila entre 27,81% y el 91,93%. En esta cubierta, el evento que trascoló menor cantidad de agua corresponde al 16 de julio de 2006, con un 28%, siendo la precipitación del evento 1,80 mm. Por otro lado, el evento que registró los valores más altos de agua trascolada corresponde al 27 de abril de 2007, con un 96% de 15,4 mm de precipitación.

En cuanto a la escorrentía cortical, la media de los 12 eventos estudiados es 0,23 mm, el

valor mínimo registrado en un solo evento es prácticamente despreciable (0,006 mm), y el máximo apenas supera 1 mm. En valores relativos, la escorrentía cortical solamente supone un 1,98% del total de la precipitación registrada en esos eventos.

##### *4.1.2. Trascolación y escorrentía cortical en la parcela de haya*

- Periodo con hojas.

Durante los meses de primavera y verano se produjo una trascolación media de 449,47 mm en los pluviómetros situados en el sector de la parcela de haya sin matorral, lo que supone un 74,24% del total de la precipitación registrada en 45 eventos. Por otro lado, en el sector de cubierta de haya con matorral durante el mismo periodo, la cantidad de agua trascolada ha sido de 398,53 mm, lo que supone un 65,75% del total.

Por regla general, los porcentajes más elevados de agua interceptada se han producido en los meses de verano, generalmente entre junio y septiembre. En ambos sectores (sólo haya y haya con matorral) el evento que trascoló menor cantidad de agua corresponde al 16 de julio de 2006, con una precipitación de 1,80 mm sólo se recogió entre el 23 y el 29% –los porcentajes más bajos siempre correspondieron a puntos bajo cubierta de matorral– lo que significa que más del 75% de la lluvia no alcanzó el suelo. Al contrario, el evento que más cantidad de agua trascoló corresponde al 13 de septiembre de 2006. Se trata de un evento voluminoso (18,80 mm) en el que la mayor parte (entre el 94 y el 97%, el valor menor corresponde a puntos bajo matorral) de la precipitación alcanzó el suelo. Este evento se produjo tras una secuencia de varios días seguidos de lluvias.

La escorrentía cortical media registrada en el periodo en el que las hayas conservan las hojas ha sido de 1,13 mm. El valor mínimo registrado es insignificante (0,019 mm) como también ocurría en la parcela de pino, mien-

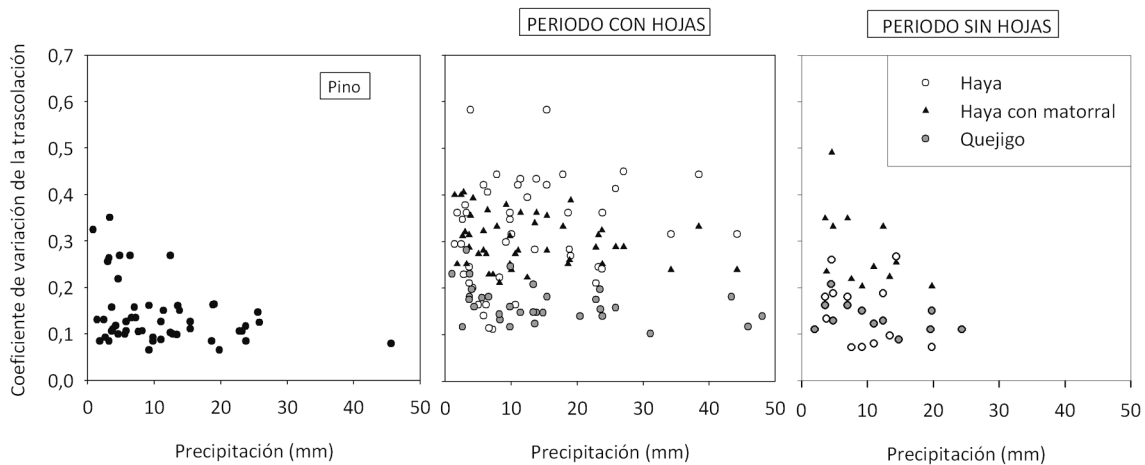


Figura 4. Tendencia del coeficiente de variación de la trascolación en relación con el incremento de la precipitación.  
 Figure 4. Throughfall variation trends in relation to increasing rainfall.

tras que el máximo, con un valor muy superior, no llega a los 5 mm. En valores relativos la escorrentía cortical media de estos eventos esta cerca del 8% de la precipitación total.

- Periodo sin hojas.

Durante los meses de invierno de los dos años de muestreo, el volumen de precipitación trascolada recogido en la parcela de haya ha sido de 94,37 mm, un 80,26% de la precipitación total acumulada en los 12 eventos del periodo. En la parcela de haya con matorral la cantidad de agua trascolada es de 83,55 mm, y representa un 70,53% del total de la precipitación. El evento que trascoló menor cantidad corresponde al 4 de diciembre de 2007 (4,6 mm), con un valor entre el 31% bajo haya y matorral y el 43,73% bajo haya. Por otro lado, el evento con un valor mayor de trascolación corresponde al 22 de enero de 2007 (13,40 mm), con un 87% bajo haya con matorral y un 97% en el sector sin matorral, esto pone de manifiesto que es en la estación invernal cuando la trascolación alcanza valores más elevados.

La escorrentía cortical media registrada en este periodo ha sido de 3,08 mm. Aunque

este valor se ha estimado a partir de tan sólo 4 eventos, al menos se ha podido obtener una aproximación cuantitativa de este proceso. El valor mínimo registra algo menos de 1 mm (0,60 mm) y el resto de eventos supera este valor sin sobrepasar los 2 mm. En valores relativos, la escorrentía cortical de estos eventos alcanza un valor más alto, superior al 10%, si se compara con el verano o con otros tipos de cubierta. En este sentido, podría suponerse que la ausencia de cubierta foliar favorece una mayor escorrentía cortical, algo que parece bastante lógico en árboles de tronco grueso, ramas robustas y poca rugosidad. Es evidente que el número de eventos considerado es muy escaso, pero el incremento de volumen es importante con respecto a los eventos registrados en el verano en la misma parcela y, la diferencia es aún mayor en comparación con la observada en la parcela bajo pino y para las mismas lluvias. Por tanto, se puede considerar que el drenaje cortical del haya es mucho más eficiente que el del pino y, en consecuencia, es un proceso que debe ser considerado en estudios asociados a la interceptación en bosques de haya, especialmente durante los periodos sin hoja.

#### 4.1.3. Trascalación y escorrentía cortical en la parcela de quejigo

- Periodo con hojas.

Bajo cubierta de quejigo y durante los meses correspondientes al verano se ha registrado una precipitación trascolada de 408,74 mm, lo que supone un 76,86% de la precipitación total acumulada en 32 eventos. El rango de valores ha oscilado entre un 32%, correspondiente a una precipitación de 2,2 mm, y el valor máximo un 93%, un evento de 9,8 mm.

- Periodo sin hojas

Durante los meses de invierno la trascolación acumulada en todos los eventos (13) ha sido de 109,38 mm, que representa un 79,02% del total de la precipitación acumulada. El rango de valores oscila entre 10,56% para un evento de 4,6 mm y el 88,80% para una precipitación de 14,80.

En ambos periodos y mientras los dispositivos para el control de la escorrentía cortical han estado activos, no se ha registrado ningún volumen, por lo que se le ha asignado un valor cero a esos eventos.

#### 4.2. Variabilidad de la trascolación

En la figura 4 se muestra la tendencia del coeficiente de variación de la trascolación en relación con el volumen total de precipitación. De forma general, en precipitaciones de volúmenes pequeños se muestra una variación de la trascolación importante, mientras que los eventos de mayor magnitud son los que muestran las diferencias más pequeñas. Sin embargo, se observan algunas diferencias entre las tres parcelas que, en el caso de especies caducifolias, podría relacionarse con los cambios estacionales de la densidad de la cubierta foliar.

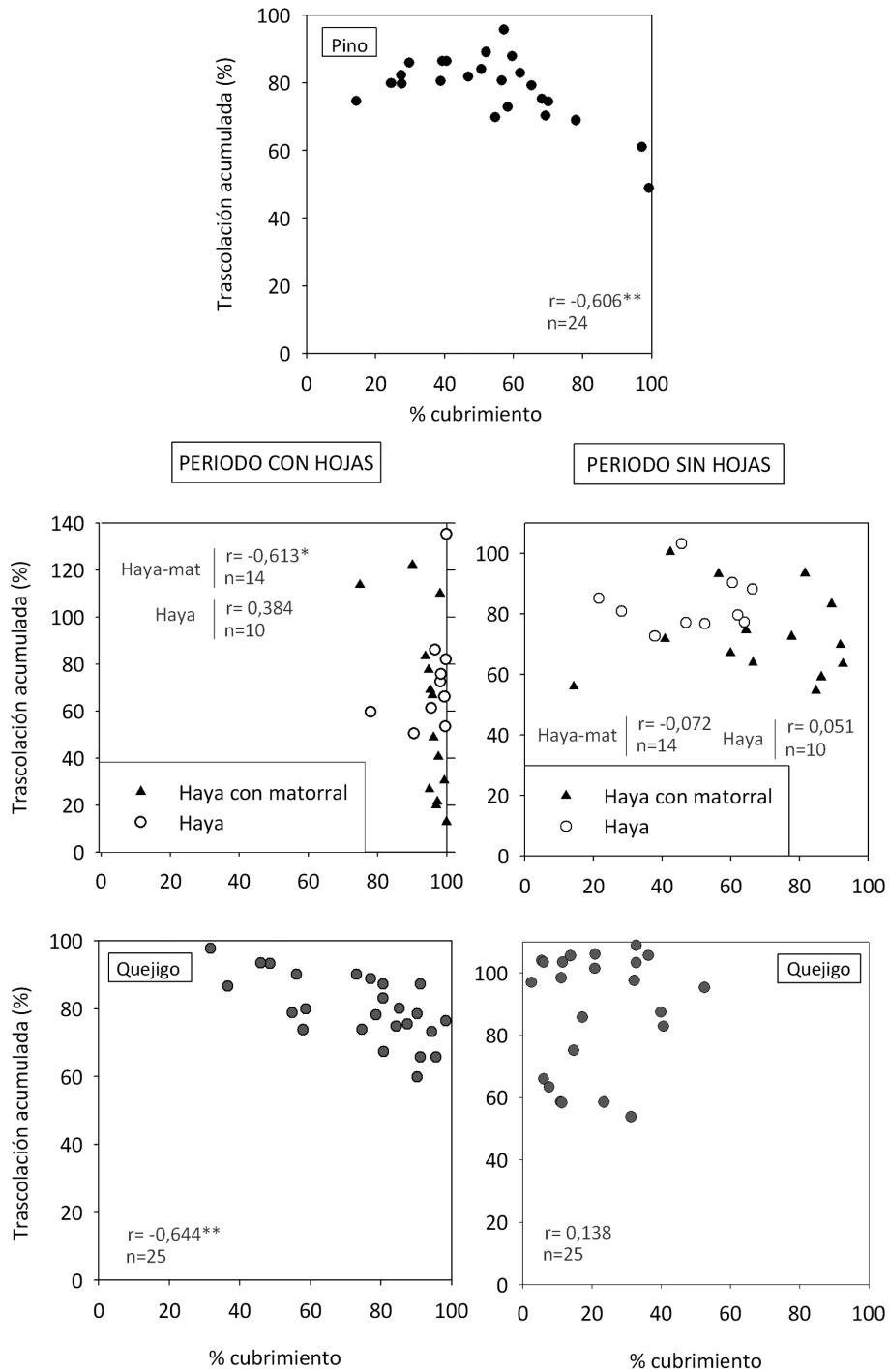
La parcela con cubierta de pino (perennifolia) es la que muestra una relación más clara entre el incremento de la precipitación y el descenso del coeficiente de variación, con valores que pueden oscilar entre 0,07 y 0,35

cuando la cantidad de precipitación no supera las 5 mm y que se sitúan entre 0,08 y 0,17 cuando las precipitaciones superan los 20 mm.

Para analizar estas relaciones con las especies caducifolias (haya y quejigo) se han diferenciado los periodos con mayor y menor densidad foliar (verano e invierno respectivamente). En ambos casos, durante el periodo con hojas es donde se observa que la variación es mayor.

Así, la parcela bajo quejigo muestra la mayor estabilidad estacional de los coeficientes de variación, incluso para las precipitaciones de menor volumen. En este caso, los coeficientes más elevados siempre están por debajo de 0,3 en verano y de 0,22 en invierno, mientras los valores más bajos generalmente se sitúan alrededor de 0,1.

La mayor heterogeneidad se observa en la parcela de haya, donde hay que tener en cuenta que la presencia de matorral incrementa la complejidad del proceso. Así, la trascolación en los puntos afectados únicamente por cubierta arbórea muestra una variación mayor a la observada en las otras dos parcelas, tanto en verano como en invierno, aunque estas diferencias parecen incrementarse durante el verano, con valores del coeficiente de variación que pueden oscilar entre 0,1 y 0,58 (para precipitaciones por debajo de 20 mm) o entre 0,22 y 0,45 (para precipitaciones de más de 20 mm). Sin embargo, durante el invierno la variación se reduce considerablemente como muestran coeficientes de variación (0,07-0,28) similares a los registrados en la parcela bajo quejigo. Por otro lado, se observan diferencias significativas cuando el suelo presenta también cubierta de matorral. En estos casos destaca una mayor homogeneidad entre los coeficientes de variación registrados en verano (0,22-0,41) e invierno (0,21-0,49), aunque la relación inversa de dichos coeficientes con respecto al volumen de precipitación es más evidente en invierno,



\* La correlación es significativa al nivel 0,05.\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01.

Figura 5. Relación del porcentaje de cubrimiento y la trascolación en cada una de las cubiertas estudiadas.  
 Figure 5. Relationship between cover percentage and throughfall in each forest cover type studied in this work.

Tabla 2. Porcentaje de cubrimiento de las distintas parcelas en los distintos periodos del año y el valor de trascolación correspondiente.

Table 2. Forest cover percentage of the experimental plots along different periods of the year and corresponding throughfall value.

	Verano				Invierno		
	Pino	Haya	Haya con matorral	Quejigo	Haya	Haya con matorral	Quejigo
Cubrimiento (%)	54,22	94,37	82,94	73,12	48,64	68,16	20,70
Desviación estándar	21,14	6,78	6,20	19,35	15,49	23,28	14,35
Coefficiente variación	0,39	0,07	0,07	0,26	0,32	0,34	0,68
Trascolación (%)	75	74,24	65,75	76,86	80,26	70,53	79,02

con una reducción significativa de los valores máximos de dicho coeficiente cuando el volumen de precipitación supera los 10 mm. Esto parece lógico, si se tiene en cuenta que la densidad foliar de estos arbustos no presenta apenas variaciones estacionales y, por consiguiente, las diferencias estacionales de la trascolación está asociadas a los cambios de la cubierta arbórea.

#### 4.3. Relación entre la cubierta vegetal y la trascolación

En la figura 5 se ha muestra la relación entre la cobertura de vegetación media sobre cada pluviómetro (considerado como un valor constante) y el porcentaje de precipitación media trascolada en el conjunto de eventos considerado en los mismos puntos. En ese gráfico (Fig. 5) se distingue según el tipo de cubierta, al igual que en los análisis anteriores.

Con respecto a la cubierta de pino, lo primero a destacar es la importante variabilidad de la cubierta vegetal. Así, hay puntos de la red de la parcela cuyo porcentaje de cobertura únicamente alcanza un valor del 20% mientras en otros es prácticamente total. La correlación entre ambas variables es significativa e inversa ( $r = -0,606^{**}$ ) y es no lineal ya que parece que hasta que no se alcanza el 50% de cobertura no hay una variación clara.

En la parcela de haya se observa una notable diferencia en el comportamiento de la trascolación entre el periodo con hojas y sin ellas. Durante el periodo con hojas, en primer lugar destaca la gran homogeneidad de la cubierta, la mayoría de los casos indican un cubrimiento de más del 90%, exceptuando dos puntos en los que ronda el 75%, indistintamente si se trata de un punto con cubierta arbustiva o sin ella. Sin embargo, los valores más bajos de trascolación están asociados a puntos bajo cubierta de matorral en todos los casos. En este sentido, juega un papel importante la propia organización estructural del árbol, y es que las hayas forman un entramado continuo que distribuye las hojas a lo largo de planos paralelos (Gómez Manzaneque, 2001; André *et al.*, 2008). En los momentos en los que hay hojas, cada uno de estos planos participan en la cobertura total del suelo, siendo aquí el estrato de matorral un plano más que no participa en exclusiva a la hora de cubrir el suelo. Así, la correlación entre el porcentaje de cobertura y la trascolación demuestra que la presencia de matorral es determinante, lo cual se pone de manifiesto a partir observar los coeficientes de correlación, significativo ( $r = -0,613^{*}$ ) bajo cubierta de matorral y sin significación estadística ( $r = 0,384$ ) bajo cubierta arbórea exclusivamente. En el periodo con hojas es además cuando los valores de trascolación se muestran más variables entre unos puntos y otros, a pesar de que las coberturas sean similares,

esto es especialmente evidente en ausencia de cubierta de matorral. Otro aspecto que se debe destacar son los procesos de coalescencia, hecho que se observa en determinados puntos que, durante todo el periodo de muestreo, han registrado más del 100% de la lluvia total, especialmente sucede con cubierta de matorral.

En el periodo sin hojas, la variabilidad espacial del porcentaje de cubrimiento observado es mucho más alta, de la misma forma que se veía en la cubierta de pino, existen puntos donde el porcentaje de cobertura es inferior al 20% y otros en los que la cobertura supera el 90%. En esta parcela la diferencia entre tener cubierta de matorral añadida o no también es evidente: en la mayor parte de los puntos donde sólo hay haya, los porcentajes de cobertura son inferiores que en los puntos donde hay haya y matorral. Generalmente es en los puntos donde no hay presencia de matorral donde se acumula más cantidad de agua trascolada (ver Tabla 2).

Finalmente, en la parcela de quejigo se aprecian importantes diferencias estacionales en el cubrimiento, aunque son menos acentuadas que en la parcela de haya (Tabla 2). En el periodo con hojas, sin embargo, la tendencia es evidente, conforme aumenta el porcentaje de cobertura se observa cómo la cantidad de precipitación acumulada es menor ( $r=-0,644^{**}$ ). En esta parcela y en este momento del año, la variabilidad en la cobertura también es alta, con un comportamiento mucho más parecido al observado bajo cubierta de pino.

En el periodo invernal, aunque sí existe variabilidad, no es tan grande como en el caso del haya. La mayor parte de los puntos presentan valores bajos de cobertura, el rango oscila entre el 10 y el 50%, habiendo algunos puntos con valores próximos al 0%. A pesar de que el quejigo es una especie que suele mantener las hojas hasta el nacimiento de las nuevas, el viento es uno de los factores que provoca su caída. La variabilidad de la trasco-

lación es importante, y, como se aprecia en la figura, no hay una tendencia definida con respecto al porcentaje de cobertura ( $r=0,138$ ).

#### *4.4. Relación entre el tipo de lluvia y la trascolación*

Como se ha observado en la figura 3, la precipitación y trascolación muestran una relación que se ajusta mejor a una función de tipo logarítmico o exponencial que a una recta, poniéndose de manifiesto la importancia de la magnitud de la precipitación. Para determinar si es así, se ha realizado una clasificación entre todos los eventos, diferenciando cuatro grupos en función del volumen de la precipitación: precipitaciones menores de 5 mm, precipitaciones entre 5 y 10 mm, precipitaciones entre 10 y 20 mm y precipitaciones de más de 20 mm. En la tabla 3 se muestran, para cada uno de los grupos anteriores, los valores medios de precipitación total, % de trascolación, índice I/P (que relaciona la interceptación con la precipitación de un evento), intensidad y duración de la lluvia.

Mediante un análisis ANOVA, que ha demostrado que únicamente existen similitudes en la intensidad de precipitación (0,356), mientras las demás variables han revelado ser estadísticamente distintas con un nivel de confianza de 0,05. Debido al escaso número de eventos registrado en invierno se ha descartado considerar la estacionalidad, por ello los resultados de este análisis son anuales.

Cuando las precipitaciones son inferiores a 5 mm se observa que los valores porcentuales de la trascolación son bajos, en torno al 50%. Por regla general, y tal y como se ha observado comparando todas las cubiertas, es el haya y matorral juntos los que trascolan menor cantidad de agua, con un valor promedio de hasta un 10% menos. El resto de cubiertas presentan valores similares en torno a 58%. Los valores medios del índice I/P oscilan entre 0,40 y 0,52. Los valores medios de in-

tensidad de la lluvia para este tipo de precipitaciones son bajos, ( $2,16 \text{ mm h}^{-1}$ ), y además suelen ser de poca duración en el tiempo, no llegando a 3 horas por evento como valor medio. Estos eventos se producen con condiciones atmosféricas con valores de humedad relativa previa al evento en torno al 85%. Además en los días precedentes no producen lluvias o cuando las hay, éstas son de muy poca entidad (menos de 5 mm).

Cuando las precipitaciones son de entre 5 y 10 mm, los valores medios de trascolación son mayores, oscilan entre el 73% y el 80%. De la misma forma que ocurre en el caso anterior, cuando hay presencia de matorral la trascolación es menor que cuando sólo hay cubierta arbórea. Los valores de I/P son más bajos que en el grupo anterior, y oscilan entre 0,19 y 0,27. Los valores medio de intensidad están en torno a  $4 \text{ mm h}^{-1}$ , un valor ligeramente superior al del grupo anterior, y la duración es también ligeramente mayor, casi tres horas y media. Este tipo de eventos es el más frecuente a lo largo del año, y se puede producir tanto en "situaciones frontales" con varias lluvias consecutivas, cuyos valores de humedad relativa son altos (alrededor del 94%), como en tormentas aislada, con valores de humedad relativa bastante inferiores (en torno al 70% o menos) siendo los valores de trascolación menores en estas condiciones.

Las precipitaciones con volúmenes entre 10 y 20 mm presentan intensidades de precipitación similares al grupo anterior (5 y 10 mm). La principal diferencia es que los eventos de este grupo tiene una mayor duración en el tiempo (alrededor de 6 horas). Los valores de trascolación y de I/P son similares en los dos casos de cubierta de haya al grupo anterior, 73% bajo haya y matorral y 80% bajo haya. En cubiertas de pino y quejigo la trascolación es ligeramente superior que en el grupo anterior y los coeficientes I/P son algo inferiores. Este tipo de eventos, como también ocurría en el caso anterior, vienen asociados generalmente al paso de frentes con

una duración de varios días, en estos casos la humedad relativa asociada al evento es alta (88%). Aquellos eventos que no van ligados a frentes, sino que se producen de forma aislada, que presentan características de tipo tormentoso, están generalmente asociados a valores de humedad relativa muy bajos, próximos al 50 o 60%. Estos casos muestran valores de trascolación más altos del valor medio, y se asocian a eventos con intensidad de la lluvia muy altas, que son características de tormenta convectiva.

Finalmente, el grupo con las precipitaciones más voluminosas, presenta los valores de trascolación más altos en las cubiertas de pino y quejigo, con valores entre el 83 y el 85%. Sin embargo, bajo haya la trascolación es inferior, 79%, y bajo haya y matorral aún lo es más (68%). Las precipitaciones de este grupo son de larga duración y presentan intensidades más elevadas, el valor medio es de  $5 \text{ mm h}^{-1}$ , pero ha habido eventos con valores de intensidad superiores a  $19 \text{ mm h}^{-1}$ . Estos eventos están ligados a situaciones muy intensas que han ocasionado lluvias tormentosas de gran volumen e intensidad, pero no de forma aislada, sino que se han prolongado durante varios días.

## **5. Discusión y conclusiones**

Este trabajo aporta información acerca de los dos principales procesos implicados en la interceptación, la trascolación y la escorrentía cortical, en un ambiente forestal natural de la montaña media mediterránea. Estos dos procesos son los responsables, desde un punto de vista hidrológico, de transferir la precipitación y los solutos desde la cubierta vegetal hasta el suelo (Levia y Frost, 2003). Numerosos han sido los trabajos que, desde la perspectiva hidrológica, han cuantificado la interceptación por una especie y sus consecuencias en el balance final, pero en muy pocas ocasiones se ha realizado un estudio comparativo simultáneo de tres especies, con comportamientos tan diversos, dentro de un mismo bosque y, en consecuencia, bajo con-



diciones climáticas comparables en el Pirineo Central. De la misma forma, se han realizado muy pocos estudios con especies caducifolias en los que se hayan considerado sus dos estaciones fenológicas, un elevado porcentaje de ellos estudian sólo el periodo en el que los árboles tienen hojas. Por otro lado, no se tiene constancia de que, hasta la fecha, hayan sido objeto de estudio especies consideradas en este trabajo, como son el quejigo (*Quercus gr. faginea*) y el matorral de boj (*Buxus sempervirens*) (Llorens y Domingo, 2007), pese a ser una de las especies más abundantes de los bosques del norte de la península ibérica.

Tras analizar y comparar los resultados obtenidos en este trabajo con diversos estudios, se ha constatado que la trascolación está relacionada con las características del bosque. Este estudio aporta una información de gran valor al respecto, a partir de evaluar la trascolación en un mismo ambiente pero bajo cuatro situaciones distintas de cubierta foliar. Los aspectos que más influyen en la cantidad de agua que llega al suelo son la densidad de la masa arbórea (Cape *et al.*, 1991) y los huecos de cielo abierto o porcentaje de cubrimiento del suelo (Crockford y Richardson, 2000), el tamaño de los árboles y la estructura de la cubierta (Johnson, 1990; Masukata *et al.*, 1990; Loustau *et al.*, 1992; Llorens *et al.*, 1997; Llorens y Domingo, 2007) y las características de la precipitación (Giacomin y Trucchi, 1992). En el caso de la escorrentía cortical influyen de manera más decisiva la textura de la corteza (Schnock, 1970; André *et al.*, 2008), el ángulo de las ramas (Návar, 1993) o la imbricación de las copas (Teklehaimanot *et al.*, 1991), como veíamos que sucede en el haya.

La trascolación, como ya se ha visto en la figura 4, es un proceso tremendamente variable que, como ya observaron en sus trabajos Tobón *et al.*, (2000) y Rodrigo y Ávila (2001) o Mateos (2003), es consecuencia de las características de la precipitación (volumen e intensidad). Por esta razón, es un hecho que se

repite de forma sistemática en la mayor parte de los bosques. Generalmente, la cantidad de agua trascolada aumenta de forma rápida cuando la precipitación es superior a 5 mm, mostrando los eventos un coeficiente de variación inferior a medida que la cantidad de precipitación aumenta.

En los últimos años, muchos han sido los trabajos experimentales que han estudiado estos procesos. En la revisión que hacen Llorens y Domingo (2007) sobre un compendio de estudios llevados a cabo en los últimos 30 años en todo el arco mediterráneo, se habla de valores medios de trascolación del 79% en bosques de pino y un 0,8% de escorrentía cortical. Por otro lado, un estudio realizado bajo cubierta de pino silvestre y en una zona próxima a la cuenca de San Salvador, se ha estimado un valor medio de 73% de trascolación y un 3% de escorrentía cortical (Alvera, 1976 y 1977). Asimismo, en esta revisión se estiman valores de casi un 73% de trascolación bajo bosques de hayas y un 3% de escorrentía cortical. Asimismo, estudios realizados en otras especies de *Quercus* (Moreno, 1994; Mosello *et al.*, 2002), ya que no se ha encontrado ningún estudio anterior a este en el que se haya valorado este proceso en *Quercus gr. faginea*, hablan de valores entre un 84% y un 87% de trascolación en especies diversas del género *Quercus*. Los valores de escorrentía cortical publicados en diferentes trabajos y resumidos en Llorens y Domingo (2007), hablan de cifras muy variables y, algunas muy elevadas, según la especie del género estudiado, siendo esta variabilidad importante incluso dentro de la misma especie. Por ejemplo, en *Quercus cerris* la escorrentía cortical alcanza el 7%, mientras que en *Quercus pyrenaica* se encuentran cifras muy variables, desde valores inferiores al 1% o cercanos al 2% en el Sistema Central (Moreno, 1994; Morán-Tejeda, 2008) hasta el 6% en la Sierra Ibérica (Ibarra y Echeverría, 2004).

Los valores obtenidos en la cuenca experimental de San Salvador son bastante próximos al rango de resultados obtenidos en

estos estudios previos. Sintetizando la información obtenida en este trabajo, han quedado patentes las diferencias en cada una de las cubiertas y situaciones estacionales. Así pues, bajo pino se ha obtenido una trascolación del 75% y una escorrentía cortical del 2%; una trascolación del 74% bajo hayas en su periodo activo y una escorrentía cortical del 8%; mientras que en el periodo invernal de las hayas se registra una trascolación del 80% y una escorrentía cortical muy superior (un valor medio de 12% aunque se trata sólo de 4 eventos); y finalmente unos valores de trascolación bajo quejigo del 76% en el periodo activo y del 79% durante el periodo invernal.

Asimismo, en este trabajo se ha observado cómo es la trascolación cuando además de la cubierta arbórea (en este caso haya), hay presencia de matorral. Es importante matizar que no se ha estudiado la trascolación sólo

en matorral, lo que tampoco tendría sentido en este caso de estudio, debido a que el matorral de boj (*Buxus sempervirens*) es una especie acompañante habitual de estos bosques. Se ha constatado que, en aquellos sectores donde hay presencia de matorral de boj, el porcentaje de trascolación disminuye significativamente: en los meses de verano la trascolación es del 65%, y en los meses en los que el haya no tiene hojas (y el matorral sí, que es de hoja perenne) la trascolación alcanza un valor medio del 70%, lo que en ambos casos supone que llega al suelo alrededor de un 10% menos de la lluvia incidente que cuando sólo hay cubierta arbórea. Este resultado es importante ya que, como se pone de manifiesto en Llorens y Domingo (2007), los trabajos experimentales que consideran la cubierta de matorral son muy escasos en estos ambientes climáticos. En otros ambientes como el semiárido el papel del matorral ha sido estudiado, tanto en campo

Tabla 3. Características de los eventos en función del tamaño de la precipitación. La tabla muestra los valores medios de las variables consideradas. I/P es un índice que relaciona la interceptación del evento con la precipitación total del mismo; valores altos indican que la trascolación es baja.

Table 3. Event characteristics as a function of rainfall size. The table shows average values of the considered variables. I/P index relates interception of the event and its total precipitation value; high values indicate low throughfall.

	Menos de 5 mm				Entre 5 y 10 mm			
	Matorral	Haya	Pino	Quejigo	Matorral	Haya	Pino	Quejigo
Precipitación total	3,32	3,32	3,30	3,86	7,60	7,60	7,59	8,29
Trascolación (mm)	1,66	2,02	1,95	2,22	5,64	6,24	6,02	6,49
Trascolación (%)	47,90	58,38	59,64	57,41	73,32	80,97	78,17	76,92
I/P	0,52	0,42	0,40	0,42	0,27	0,19	0,22	0,23
Intensidad de lluvia (mm h-1)	2,16			3,91				
Duración de la lluvia (horas)	2,96			3,22				
	Entre 10 y 20 mm				Más de 20 mm			
	Matorral	Haya	Pino	Quejigo	Matorral	Haya	Pino	Quejigo
Precipitación total	14,63	14,63	16,89	15,92	28,66	28,66	24,16	27,98
Trascolación (mm)	10,76	11,78	14,05	12,84	19,56	22,79	20,30	23,71
Trascolación (%)	73,45	80,83	81,76	78,98	68,22	79,24	83,73	85,68
I/P	0,27	0,19	0,18	0,21	0,32	0,21	0,16	0,14
Intensidad de lluvia (mm h-1)	3,25			5,09				
Duración de la lluvia (horas)	6,12			10,95				

(Belmonte, 1997; Belmonte y Romero, 1998 y 1999) como el laboratorio (García-Ortiz, 2006).

Tal y como se ha podido constatar en la literatura, la trascolación, como componente que más importancia cuantitativa representa en la interceptación, es el proceso que más se ha estudiado. La escorrentía cortical, en cambio, pocas veces ha sido tenida en cuenta a pesar de la importancia de este proceso en las entradas de agua o en el ciclo de nutrientes (Levia y Frost, 2003). En este trabajo se ha estudiado durante más de un año, y, a pesar de representar porcentajes bajos en el total de la interceptación, sí se ha constatado su importancia local y las diferencias tan importantes según la especie. En el haya, el hecho de que su tronco sea tan liso facilita que los volúmenes de agua recogidos sean verdaderamente importantes (André *et al.*, 2008), más si cabe durante el periodo invernal, que, como se observa en la figura 5, cuando las hojas han caído y el porcentaje de cielo abierto es muy superior, se favorecen los procesos de coalescencia hacia las ramas y troncos, pudiendo resultar una escorrentía cortical superior a la del resto del año. En cualquier caso, aunque la escorrentía cortical registre porcentajes inferiores durante los periodos con hojas, hay que tener en cuenta que el volumen que representa es bastante elevado y, por este motivo, no debería ser ignorado.

Por otro lado, pino y quejigo presentan un tronco muy rugoso (Schnock, 1970; André *et al.*, 2008), lo que sin duda representa una dificultad para la escorrentía cortical. En este trabajo se ha observado una diferencia significativa en las características de los troncos de pino y quejigo, presentando el pino una rugosidad más acentuada que el quejigo, lo que en un principio podría facilitar la formación de pequeños regueros en el pino, por donde circularía el agua de escorrentía. En el caso del quejigo, como ya señaló (Schnock, 1970), las ramas están mucho menos desarrolladas y presentan más densidad de ramificaciones, que interrumpen el flujo de agua hacia el

tronco. Al mismo tiempo, como también se ha observado en este y otros trabajos (Keim *et al.*, 2005; Pypker *et al.*, 2006) en los troncos del quejigo se instalan con mucha frecuencia líquenes que absorben el agua y la humedad de la madera, reduciendo así la escorrentía a lo largo del tronco. En la síntesis de Llorens y Domingo (2007) destacan los altos valores de escorrentía cortical obtenidos en algunas especies de género *Quercus*, lo que contradice la ausencia de resultados obtenidos en este trabajo, algo que se ha atribuido a las características de la estructura arbórea anteriormente expuestas. Solamente se han encontrado valores bajos en trabajos realizados en el Sistema Central bajo cubierta de rebollo (Moreno, 1994).

En este estudio se ha evidenciado que las características de las precipitaciones afectan a la interceptación (Tabla 3). Estos resultados coinciden con estudios antecedentes (Cape *et al.*, 1991; Giacomini y Trucchi, 1992) en los que se destaca que la cantidad de precipitación es uno de los factores que más influyen en la cantidad de agua trascolada, incluyendo la escorrentía cortical (Xiao *et al.*, 2000). Sin embargo, también parece que se deben valorar otros aspectos asociados a la precipitación, como la intensidad de la misma o la duración, pues en este estudio también se ha observado que podrían ser factores que afectan de forma importante la cantidad de lluvia que llega al suelo. En este mismo sentido, Crockford y Richardson (2000) sugieren la importancia que tiene la continuidad de las lluvias y la proporción de los periodos secos. Tal y como se ha visto en la información obtenida en este trabajo y como afirmaban autores como Martínez y Navarro (1996), durante lluvias pequeñas con frecuencia elevada la interceptación es mayor que en aguaceros de larga duración que generalmente producen menos interceptación.

Si bien va siendo importante el número y la calidad de los estudios publicados sobre la interceptación con un carácter más hidrológico, la mayor parte de estas investigaciones se centraba, hasta hace unos años en la influen-

cia que éstos procesos tienen sobre el ciclo de nutrientes de los ecosistemas terrestres (Ingham, 1950; Parker, 1983 o Bellot y Escarrré, 1991, entre otros), sobre los procesos derivados de la interceptación como la variabilidad de las propiedades físicas y químicas de los suelos (Gesper y Holowaychuck, 1970 y 1971; Clements y Colon, 1975; Edwards, 1982) o sobre la distribución espacial de la humedad (Durocher, 1990), sin perder en ninguno de estos estudios la perspectiva biogeoquímica. Actualmente, el interés creciente por la modelización derivada del estudio de la interceptación, pone de manifiesto la relevancia de este fenómeno dentro del ciclo hidrológico como uno de los más importantes, ya que los modelos pueden ayudar a la mejor conservación y gestión de los sistemas forestales e hidrológicos. Asimismo, en estudios con perspectiva hidrológica, es aconsejable conocer la distribución de la vegetación caducifolia y perenne, pues ésta distribución puede ser una de las razones que influyen en la variabilidad de la escorrentía anual (Peel *et al.*, 2001) pudiendo ser la causa de las diferencias hidrológicas entre cabeceiras, con notables contrastes entre tiempos y volumen de escorrentía entre unas zonas y otras (Gash *et al.*, 1980).

Este hecho se hace más relevante si tenemos en cuenta que la situación forestal actual tiende a encaminarse hacia el crecimiento de la superficie arbolada, y, consecuentemente, los ecosistemas incrementarían sus necesidades hídricas, ya que el consumo de agua por parte del bosque sería mayor que el actual. A pesar de ese incremento del consumo de agua, hay que considerar que el bosque es un gran regulador de los recursos hídricos y causa una serie de beneficios en un contexto espacial más amplio, por ejemplo, en la amortiguación de caudales punta durante las crecidas (Beguería *et al.*, 2003; López-Moreno *et al.*, 2006, Serrano-Muela *et al.*, 2005 y 2008a) y en la conservación de los suelos, pues la erosión en las zonas vegetadas es mínima (García-Ruiz y López-Bermúdez, 2009). En este sentido, las áreas forestales contribu-

yen a preservar la capacidad de almacenamiento hídrica, proporcionando continuidad en los caudales fluviales durante las estaciones húmedas, aunque también reducen la escorrentía en los periodos secos, que coinciden con los de mayor déficit hídrico. Sin duda se trata un aspecto muy importante y que adquiere especial relevancia en los espacios mediterráneos, donde la marcada estacionalidad climática, con sus frecuentes sequías estivales, establece las normas del funcionamiento hidrológico. Por este motivo, los resultados aportados en este estudio pueden ser de utilidad para mejorar la gestión de los recursos hidrológicos, y sugieren la necesidad de profundizar en el estudio de procesos implicados en la respuesta hidrológica en áreas de cabecera, dado que existe una relación evidente entre las características de la cubierta vegetal y el volumen de agua que alcanza el suelo.

### **Agradecimientos**

Esta investigación se ha financiado gracias a los siguientes proyectos: "Procesos y balances de sedimentos a diferentes escalas espaciales en ambientes mediterráneos: Efectos de las fluctuaciones climáticas y los cambios de uso del suelo" PROBASE (CGL2006 11619/HID, Consolider); "Comportamiento y modelización Espacio Temporal de la transferencia de Sedimento en distintos Usos del Suelo" CETSUS (CGL2007-66644-C04-01/HID).

La monitorización de la cuenca de San Salvador se ha financiado mediante el convenio CSIC-Ministerio de Medio Ambiente (RESEL: "Red de Estaciones Experimentales de seguimiento y evaluación de la erosión y la desertificación"). La contribución del primer autor ha sido posible gracias a la beca predoctoral I3P concedida por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Los autores desean agradecer la colaboración inestimable de todas aquellas personas que ayudaron tanto en la instalación de las parcelas como en la recogida de los datos, ellos han sido Sergio Valdivielso y Teodoro Lasanta en especial, y también las siguientes personas: Noemí, Silvia, Carlos, Horacio, Jérôme, Ana, Maite, Jesús, Ángel, Sara y Cecilia.

### **Bibliografía**

Alvera, B. (1976). Contribución al estudio de la interceptación de las precipitaciones atmosféricas en el

- pinar de San Juan de la Peña. *Publicaciones del Centro Pirenaico de Biología Experimental*, 7 (I), 95-100.
- Alvera, B. (1977). Intercepción de las precipitaciones atmosféricas en un pinar altoaragonés. Segundo año de observaciones. *Publicaciones Centro Pirenaico de Biología Experimental*, 8, 15-22.
- Anderson, H.W.; Hoover, M.D.; Reinhart, K.G. (1976). *Forest and water: effects of forest management on floods, sedimentation, and water supply*. USDA, Forest Service General Technical Report Psw-18. 116 pp.
- André, F.; Jonard, M.; Ponette, Q. (2008). Influence of species and rain event characteristics on stemflow volume in a temperate mixed oak-beech stand. *Hydrological Processes*, 22, 4455-4466.
- Andréassian, V. (2004). Water and forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1-27.
- Beguiría, S.; Lopez-Moreno, J.I.; Lorente, A.; Seeger, M.; García-Ruiz, J.M. (2003). Assessing the Effect of Climate Oscillations and land-Use Changes on Streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32, 283-286.
- Bellot, J.; Escarré, A. (1991). Chemical characteristics and temporal variations of nutrients in throughfall and stemflow of three species in Mediterranean holm oak forest. *Forest Ecology and Management*, 41, 125-135.
- Belmonte, F. (1997). *Intercepción en bosque y matorral mediterráneo semiárido: Balance hídrico y distribución espacial de la lluvia neta*. Ph.D. Thesis, Universidad de Murcia. Murcia, 384 pp.
- Belmonte, F.; Romero, M.A. (1998). A simple technique for measuring rainfall interception by small scrubs "interception flow collection box". *Hydrological Processes*, 12, 471-481.
- Belmonte, F.; Romero, M.A. (1999). *Intercepción en algunas especies del matorral mediterráneo. Cuadernos de ecología y medioambiente*. Universidad de Murcia, 202 pp.
- Bosch, J.M.; Hewlett, J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 3-23.
- Brown, A.E.; Zhang, L.; McMahon, T.A.; Western, A.W.; Vertessy, R.A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310, 28-61.
- Bruijnzeel, L.A. (2001). Forest Hydrology. In: *The Forests Handbook, Vol. 1* (J.C. Evans, ed.). Blackwell Science. Oxford, 301-343.
- Calder, I.R. (1979). Do trees use more water than grass? *Water Service*, 83, 11-14.
- Cape, J.N.; Brown, A.H.F.; Robertson, S.M.C.; Howson, G.; Paterson, I.S. (1991). Interspecies comparisons of throughfall and stemflow at three sites in northern Britain. *Forest Ecology and Management*, 46, 165-177.
- Carlyle-Moses, D.E.; Flores Laureano, J.S.; Price, A.G. (2004). Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of north-eastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 297, 124-135.
- Clements, R.G.; Colon, J.A. (1975). The rainfall interception process and mineral cycling in a Montane Forest in Eastern Puerto Rico. In: *Mineral Cycling in Southeastern Ecosystems* (F.G. Howell; J.B. Gentry; M.H. Smith, eds.), Natl. Tech. Inf. Ctr., Springfield, Virginia, 813-823.
- Creus, J. (1983). *El clima del Alto Aragón Occidental*. Monografías del Instituto de estudios Pirenaicos, 109, Jaca.
- 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, 2903-2920.
- Davie, T. (2002). *Fundamentals of Hydrology*. Roudledge. London. 169 pp.
- Dietz, J.; Hölscher, D.; Leuschner, C.; Hendrayanto. (2006). Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 237, 170-178.
- Durocher, M.G. (1990). Monitoring spatial variability of forest interception. *Hydrological Processes*, 4, 215-229.
- Edwards, P.J. (1982). Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. V. Rates of cycling in throughfall and litterfall. *Journal of Hydrology*, 70, 807-827.
- Frazer, G.W.; Trofymow, J.A.; Lertzman, K.P. (1997). *A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques*. Information Report BC-X-373. Canadian Forest Service, Pacific Forestry Center, Victoria, BC.
- Frazer, G.W.; Canham, C.D.; Lertzman, K.P. (1999). *Gap Light Analyser (GLA), version 2.0: imaging software to extract canopy structure and gap light indices from true-colour fisheye photographs*. Simon Fraser University, Burnaby, BC, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, NY.
- Gallart, F.; Latron, J.; Llorens, P.; Rabadà, D. (1997). Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: some challenges for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 11, 1263-1272.
- Gallart, F.; Llorens, P. (2003). Catchment management under environmental change: impact of land cover change on water resources. *Water International*, 28, 334-340.
- García-Ortiz, E. (2006). *Efecto de la estructura de la copa en la partición de lluvia de tres especies arbustivas en clima semiárido*. Tesis Doctoral inédita, Universidad de Almería. 404 pp.
- García-Ruiz, J.M.; Balcells, E. (1978). Tendencias actua-

- les en la ganadería del Alto Aragón. *Estudios Geográficos*, 153, 539-560.
- García-Ruiz, J.M.; Arnáez, J.; Beguería, S.; Seeger, M.; Martí-Bono, C.; Regüés, D.; Lana-Renault, N.; White, S. (2005). Flood generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *Catena*, 59, 79-92.
- García-Ruiz, J.M.; Regüés, D.; Alvera, B.; Lana-Renault, N.; Serrano-Muela, P.; Nadal-Romero, E.; Navas, A.; Latron, J.; Martí-Bono, C.; Arnáez, J. (2008). Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 356 (1-2), 245-260.
- García-Ruiz, J.M.; López-Bermúdez, F. (2009). *La erosión del suelo en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza, 471 pp.
- Gash, J.H.C.; Wright, I.R.; Lloyd, C.R. (1980). Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 48, 89-105.
- Gesper, P.L.; Holowaychuck, N. (1970). Effects of stemflow water on a Miami soil under a beech tree. I Morphological and physical properties. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 779-786.
- Gesper, P.L.; Holowaychuck, N. (1971). Some effects of stemflow from forest canopy trees on chemical properties of soil. *Ecology*, 52, 691-702.
- Giacomin, A.; Trucchi, P. (1992). Rainfall interception in a beech coppice (Acquerino, Italy). *Journal of Hydrology*, 137, 141-147.
- Gómez Manzaneque, F. (2001). *Los bosques ibéricos*. Editorial Planeta, 598 pp.
- Herwitz, S.R. (1988). Buttresses of tropical rainforest trees influence hillslope processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 563-567.
- Hibbert, A.R. (1967). Forest Treatment effects on water yield, Reprint from *Proceedings of International Symposium on Forest Hydrology*, Penn State University, 1965 527-543, Pergamon Press, New York.
- Horton, R.E. (1919). Rainfall interception. *Monthly Weather Review*, 47, 603-623.
- Ibarra, P.; Echevarría, M.T. (2004). Relaciones clima, suelo y vegetación en la vertiente noreste del Moncayo. En: *Geografía Física de Aragón* (J.L. Peña; L.A. Longares; M. Sánchez, eds.). Aspectos generales y temáticos. Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico. Zaragoza, 199-211.
- Ingham, G. (1950). Mineral content of air and rain and its importance to agriculture. *Journal Agriculture Science*, 40, 50-61.
- Johnson, R.C. (1990). The interception, throughfall and stemflow in a forest Highland Scotland and the comparison with other upland forests in the U.K. *Journal of Hydrology*, 118, 281-287.
- Jones, J.A. ; Post, D.A. (2004). Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and regrowth in the northwest and eastern United States, *Water Resources Research*, 40 (5).
- Keim, R.F.; Skaugset, A.E.; Weiler, M. (2005). Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. *Journal of Hydrology*, 314, 263-274.
- Lana-Renault, N. (2007). *Respuesta hidrológica y sedimentológica en una cuenca de montaña media afectada por cambios de cubierta vegetal: la cuenca experimental de Arnás, Pirineo Central*. Tesis Doctoral inédita, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 314 pp.
- Lasanta, T. (1988). The process of desertion of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 132, 15-36.
- Latron, J., 2003. *Estudio del funcionamiento hidrológico de una cuenca mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineos Catalanes)*. Dept. de Geolímica, petrología i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia. Barcelona, Universitat de Barcelona, 269 pp.
- Levia, D.F.; Frost, E.E. (2003). A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*, 274, 1-29.
- 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, 331-345.
- Llorens, P.; Gallart, F. (2000). A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology*, 240, 131-144.
- Llorens, P.; Domingo, F. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335, 37-54.
- López-Moreno, J.I.; Beguería, S.; García-Ruiz, J.M. (2006). Trends in high flows in the Central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land use change? *Hydrological Sciences Journal*, 51, 1039-1050.
- Loshali, D.C.; Singh, R.P. (1992). Partitioning of rainfall by three Central Himalayan forests. *Forest Ecology and Management*, 53 (1-4), 99-105.
- Loustau, D.; Berbigier, P.; Granier, A.; El Hadj Musa, F. (1992). Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I-Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology*, 138, 449-467.
- Lull, H.W.; Reinhart K.G. (1967). *Increasing Water Yield in the Northeast by Management of Forested Watersheds*. USDA, Forest Service Research Paper NE-66, Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, PA, 45 pp.
- Martínez, A.; Navarro, J. (1996). *Hidrología forestal, el ciclo hidrológico*. Universidad de Valladolid. Secretariado de publicaciones. 286 pp.
- Masukata, H.; Ando, M.; Ogawa, H. (1990). Throughfall, stemflow and interception of rainwater in an evergreen broadleaved forest. *Ecological Research*, 5, 303-316.

- Mateos, B.; Schnabel, S. (2001). Rainfall interception by holm oak in mediterranean open woodland. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 27, 27-38.
- Mateos Rodríguez, A.B. (2003). *Interceptación de la lluvia por la encina en espacios adhesados*. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones, Cáceres, 152 pp.
- Molinillo, M.; Lasanta, T.; García-Ruiz, J.M. (1997). Managing mountainous degraded landscapes after farmland abandonment in the Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management*, 21, 587-598.
- Montserrat Recoder, P. (1971). El ambiente vegetal jacetano. *Pirineos*, 101, 5-22.
- Morán-Tejeda, C.; Martínez Fernández, J.; Hernández Santana, V.; Cano Crespo, A. (2008). Trascología y pérdidas por interceptación en un bosque de roble melojo del Sistema Central. *Cuadernos de investigación geográfica*, 34, 7-22.
- Moreno, G. (1994). *Balances de agua y nutrientes en rebollares (Quercus pyrenaica Willd.) de la vertiente salmantina de la Sierra de Gata*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, Salamanca, 470 pp.
- Mosello, R.; Brizzio, M.C.; Kotzias, D.; Marchetto, A.; Rembges, D.; Tartari, G. (2002). The chemistry of atmospheric deposition in Italy in the framework of the National Programme for Forest Ecosystems Control (CONECOFOR). *Journal of Limnology*, 61 (1), 77-92.
- Nadal-Romero, E. (2008). *Las áreas de cárcavas (badlands) como fuente de sedimento en cuencas de montaña: procesos de erosión, meteorización, erosión y transporte en margas del Pirineo Central*. Tesis Doctoral inédita. Universidad de Zaragoza, 434 pp.
- Návar, J. (1993). The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 145, 175-190.
- Neal, C. (1990). Comments on "Sample size requirements for estimation of throughfall chemistry beneath a mixed hardwood forest" (Letters to the Editor). *Journal of Environmental Quality*, 19, 633-634.
- Olsson, L.; Carlsson, K.; Grip, H.; Perttu, K. (1982). Evaluation of forest-canopy photographs with diode-array scanner OSIRIS. *Canadian Journal of Forest Research*, 12, 822-828.
- Parker, G.G. (1983). Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, 13, 58-133.
- Peel, M.C.; McMahon, T.A.; Finlayson, B.L.; Watson, F.G. (2001). Identification and explanation of continental differences in the variability of annual runoff. *Journal of Hydrology*, 250 (1-4), 224-240.
- Poyatos, R.; Latron, J.; Llorens, P. (2003). Land use and land cover change after farmland abandonment. The case of a Mediterranean Mountain area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development*, 23, 362-368.
- Puigdefábregas, J.; Creus, J. (1976). Pautas espaciales de variación climática en el Alto Aragón. *Publicaciones del Centro Pirenaico de Biología experimental*, 7 (1), 23-34.
- Pypker, T.G.; Unsworth, M.H.; Bond, B.J. (2006). The role of epiphytes in rainfall interception by forests in the Pacific Northwest. II. Field measurements at the branch and canopy scale. *Canadian Journal of Forest Research*, 36 (4), 819-832.
- Reynold, E.R.C.; Henderson, C. (1967). Rainfall interception by beech, larch and Norway spruce. *Forestry*, 40, 165-184.
- Rodrigo, A.; Ávila, A. (2001). Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forest. *Journal of Hydrology*, 243 (3-4), 216-227.
- Sahin, V.; Hall, M.J. (1996). The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, 178 (1-4), 293-309.
- Serrano-Muela, M.P.; Regüés, D.; Latron, J.; Martí Bono, C.; Lana-Renault, N.; Nadal Romero, E. (2005). Respuesta hidrológica de una cuenca forestal en la montaña media pirenaica: el caso de San Salvador. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 31, 59-76.
- Serrano-Muela, M.P.; Lana-Renault, N.; Nadal-Romero, E.; Regüés, D.; Latron, J.; Martí-Bono, C.; García-Ruiz, J.M. (2008a). Forests and their hydrological effects in Mediterranean mountains: the case of the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 28 (3-4), 279-285.
- Serrano-Muela, P.; Regüés, D.; Lana-Renault, N.; Nadal-Romero, E. (2008b). Estudio de la trascología bajo diferentes tipos de cubierta forestal durante el periodo fenológico con hojas en el Pirineo Central Español. En: *Trabajos de Geomorfología en España, 2006-2008*. (J. Benavente; F.J. Gracia, eds.). Sociedad Española de Geomorfología, Cádiz, 101-104.
- Schnock, G. (1970). *Le bilan d'eau et ses principales composantes dans une chênaie mélangée calcicole de Haute-Belgique (Bois de Virelles-Blaimont)*. PhD dissertation, ULB, Bruxelles.
- Sopper, W.E.; Lull, H.W. (1967). *Forest hydrology: Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar held at the Pennsylvania State University*, University Park, Pennsylvania. Pergamon Press, New York.
- Stednick, J.D. (1996). Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176 (1-4), 79-95.
- Teklehaimanot, Z.; Jarvis, P.G.; Ledger, D.C. (1991). Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing. *Journal of Hydrology*, 123, 261-278.
- Tobón Marín, C.; Bouten, W.; Sevink, J. (2000). Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*, 237, 40-57.
- Trimble, S.W.; Weirich, F.H.; Hoag, B.L. (1987). Refor-

- estation and the reduction of water yield on the southern piedmont since circa 1940. *Water Resources Research*, 23 (3), 425-437.
- Vicente-Serrano, S.M.; Lasanta, T.; Romo, A. (2004). Analysis of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish Central Pyrenees: Role of Human Management. *Environmental Management*, 34, 802-818.
- Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; Lasanta, T. (2006). Diversidad espacial de la actividad vegetal en campos abandonados del Pirineo Central español: análisis de los procesos de sucesión mediante imágenes Landsat (1984-2001). *Pirineos*, 161, 59-84.
- Wagner, S. (1998). Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90: 103-117.
- Whitehead, P.G.; Robinson, M. (1993). Experimental basin studies-an international and historical perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology*, 145, 217-230.
- Whelan, M.J.; Anderson, J.M. (1996). Modelling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale. *Journal of Hydrology*, 186, 335-354.
- Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil erosion. *Transactions American Geophysical Union*, 39, 285-291.
- Xiao, Q. ; McPherson, E.G. ; Ustin, S.L. ; Grismer, M.E. ; Simpson, J.R. (2000). Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes*, 14, 763-784.
- Zinke, P.J. (1967). Forest interception studies in the Unites States. In: *Forest hydrology* (W. Shopper; H. Lull, eds.). New York, 137-161.
- Zirlewagen, D.; von Wilpert, K. (2001). Modelling water and ion fluxes in a highly structured, mixed-species stand. *Forest Ecology and Management*, 143, 27-37.