



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Programa doctoral

Recursos naturales y sostenibilidad

**MODELACIÓN DE LA INTERCEPTACIÓN
DE LLUVIA EN INDIVIDUOS AISLADOS DE
PINUS PINEA Y CISTUS LADANIFER:
EFECTO DE DIFERENTES PARÁMETROS
CLIMÁTICOS Y DE VEGETACIÓN**

TESIS DOCTORAL

Presentada por

Rafael Pérez Arellano

Directores

Dr. José Roldán Cañas

Dra. María Fátima Moreno Pérez

Mención de Doctorado Internacional

Octubre 2016

TITULO: *Modelación de la interceptación de lluvia en individuos aislados de pinus pinea y cistus ladanifer: efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación*

AUTOR: *Rafael Pérez Arellano*

© Edita: UCOPress. 2016
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

Mención internacional en el título de doctor

Esta tesis cumple con los requisitos establecidos por la Universidad de Córdoba para la obtención de la mención internacional en el título de doctor:

- Estancia de 3 meses realizada en Water Management department, de Delft University of Technology (Holanda), bajo la supervisión de la Dra. Miriam Coenders-Gerrits.
- Informe previo de dos doctores externos y con experiencia investigadora acreditada de alguna institución de educación superior o instituto de investigación de fuera de España.
- Un miembro del tribunal pertenece a un centro de investigación extranjero.
- Parte de la tesis está escrita en inglés y castellano.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO AGRONOMÍA

ÁREA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

Programa doctoral

Recursos naturales y sostenibilidad

**MODELACIÓN DE LA INTERCEPTACIÓN
DE LLUVIA EN INDIVIDUOS AISLADOS DE
PINUS PINEA Y CISTUS LADANIFER:
EFECTO DE DIFERENTES PARÁMETROS
CLIMÁTICOS Y DE VEGETACIÓN**

Tesis Doctoral presentada por Rafael Pérez Arellano, en satisfacción de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo dirigida por los Drs. José Roldán Cañas y M^a Fátima Moreno Pérez de la Universidad de Córdoba.

Los directores:

El doctorando:

Fdo: Dr. José Roldán Cañas

Fdo: Rafael Pérez Arellano

Fdo: Dra. M^a Fátima Moreno Pérez

Córdoba, Octubre de 2016

A mi hija, Sara.



TÍTULO DE LA TESIS:

MODELACIÓN DE LA INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA EN INDIVIDUOS AISLADOS DE PINUS PINEA Y CISTUS LADANIFER: EFECTO DE DIFERENTES PARÁMETROS CLIMÁTICOS Y DE VEGETACIÓN

DOCTORANDO: Rafael Pérez Arellano

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

El proceso de interceptación por la lluvia no ha sido merecedor de una gran atención por la comunidad profesional que, habitualmente, lo estima como un porcentaje constante de la precipitación. Sin embargo, como se demuestra en esta tesis doctoral, la cantidad de agua que es interceptada por la vegetación y, que al ser evaporada, no alcanza la superficie del suelo, depende, en primer lugar, del tipo y estructura del follaje, y, en segundo lugar, de las condiciones climáticas, especialmente de la intensidad de la precipitación.

Dentro de la comunidad científica, la interceptación ha sido ampliamente tratada en bosques continuos propios de climas húmedos pero los entornos áridos y semiáridos, en los que la vegetación es dispersa, no han recibido el mismo tratamiento. Especialmente importante en el sur de España es la formación denominada dehesa, sistema formado por árboles aislados, propios de nuestras condiciones climáticas y edáficas, que coexisten con pastizales o matorrales.

En este sentido, el trabajo se ha orientado hacia el estudio de la interceptación en individuos aislados de las dos especies, una arborícola y otra arbustiva, más abundantes y significativas de la dehesa de la Sierra Albarrana situada al noroeste de la provincia de Córdoba: *Pinus pinea* (pino piñonero) y *Cistus ladanifer* (jara).

La tesis en su conjunto representa un claro avance del conocimiento en este campo de los recursos hídricos y, en concreto, los resultados obtenidos proporcionan un gran progreso en el establecimiento del balance hídrico superficial en zonas adehesadas características de nuestro entorno, a la par que permiten la estimación de la cantidad de

agua que se infiltra en el terreno y se incorpora al flujo subsuperficial, punto de partida fundamental para el mejor funcionamiento de modelos complejos de flujo subterráneo.

El presente trabajo de investigación está soportado por una amplia labor experimental, desarrollada durante los últimos cinco años, en condiciones difíciles pues las parcelas de campo se encuentran a 140 km de Córdoba capital y en una zona de acceso muy restringido. En estas condiciones, la instrumentación de las parcelas, así como la toma de datos en tiempo real, ha sido ardua y compleja.

La tesis está estructurada en los capítulos clásicos y cabe destacar la amplia profusión de parámetros analizados (trascolación, escorrentía cortical, tiempo de secado del dosel, capacidad de almacenamiento del dosel, índice de área foliar, humedad del suelo,...), incluyendo la relación de estos con parámetros climáticos, así como la calibración de los modelos clásicos de interceptación, incluyendo su mejora y adaptación a nuestras condiciones climáticas y de vegetación para los que no fueron desarrollados.

Por todo lo anterior, consideramos que la tesis reúne los suficientes requisitos de calidad como para que pueda ser presentada y defendida ante el tribunal designado.

Como indicios de calidad, cabe citar que de ella se han derivado tres artículos en revistas (uno en proceso de revisión y otro en prensa), cuatro comunicaciones en congresos internacionales y siete en congresos nacionales, pudiendo destacarse las siguientes:

- Pérez Arellano, R.; Moreno Pérez, M.F., Roldán Cañas, J. 2016. Comparación de modelos de interceptación de agua en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. Ingeniería del Agua, 20(3): 153-168. DOI: 10.4995/Ia.2016.4713.
- Pérez Arellano, R.; Moreno Pérez, M.F., Roldán Cañas, J. 2016. Estimation of canopy drying time after rainfall using leaf wetness sensor in *Pinus pinea* in a Mediterranean forest in Córdoba, Spain. Acta del European Geosciences Union General Assembly 2016. Viena (Austria).
- Pérez Arellano, R.; Moreno Pérez, M.F., Roldán Cañas, J. 2015. Interceptación de la lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*: efecto de diferentes parámetros climáticos. Actas de las IV Jornadas de Ingeniería del Agua. Córdoba

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 23 de Septiembre de 2016

Firma del/de los director/es

Fdo: José Roldán Cañas;

Fdo.: María Fátima Moreno Pérez

Agradecimientos

Poder escribir las últimas líneas de la tesis doctoral es un motivo de inmensa alegría, que quisiera compartir con todos los que me han ayudado y me han querido..

Quiero comenzar agradeciendo a mis directores de tesis, José Roldán y Fátima Moreno, su trabajo y dedicación, que han permitido que esta tesis saliera adelante. Quiero agradecer la acogida que tuve por parte de José Roldán, sus consejos y sus enseñanzas han sido el camino para poder llevar a cabo mi trabajo. Gracias Pepe por esta oportunidad que me has dado y por confiar en mí desde el primer momento. Esta tesis es tan mía como de Fátima Moreno, sin las “manitas” y las “ideas” de Fátima no habría costado mucho más construir las parcelas de interceptación. También quiero agradecer el entusiasmo y dedicación de Javi, Diego, Pilar, Alicia y Walter, alumnos de prácticas que han dejado huella en esta tesis.

No me quiero olvidar del todo el equipo de trabajo del Área de Ingeniería Hidráulica de la UCO, tanto a los profesores Miguel Alcaide, Emilio Camacho, Pilar Montesinos y Juan Antonio Rodríguez, por el cariño que siempre me han mostrado, como a mis amigos y compañeros de despacho, Rafa, Irene, Jorge, Teresa, Manuel, Aida y Carmen, por vuestro apoyo personal y por los buenos momentos que hemos pasado juntos.

Deseo aprovechar estas líneas para agradecer la ayuda prestada por el personal del Departamento de Ingeniería de Suelos de ENRESA, en especial a Ignacio Cienfuegos y Silvia Rueda, por su continua y eficaz colaboración.

Quiero agradecer a la Universidad de Córdoba la concesión de una de las ayudas para realizar una estancia en un centro extranjero con el fin de obtener la mención de doctorado internacional.

Gracias a la Dra. Miriam Coenders-Gerrits, del Water Management department (Universidad Tecnológica de Delft, Holanda), por acogerme en su departamento para la realización de la estancia y por dedicar parte de su valioso tiempo a guiarme en el trabajo llevado a cabo en su centro, así como al Dr. Thom Bogaard, por compartir sus conocimientos de laboratorio y hacer de esa estancia una etapa inolvidable.

Un merecido agradecimiento a mi familia. A mi mujer, Sabina, por su apoyo incondicional, comprensión y paciencia, y a mi hija, Sara, por hacer que tuviera la

fuerza suficiente para terminar esta tesis. A mis padres, José y Mari Carmen, mi hermana, Carmen María, y mi sobrino, Aaron, por estar conmigo en todo momento.

SUMMARY

The interception is the fraction of gross precipitation that does not reach the ground, and that, after having been retained by the canopy or by the stem, returns to the atmosphere by evaporation. These interception losses constitute an important component of the gross rainfall, and it is necessary to know its value to better clarify the role of the forest cover in the water balance. This reason reveals the need of performing a study of the parameters that have some influence on the rainfall interception by the vegetative cover.

In this study, the amount of intercepted water has been estimated through the difference between the gross precipitation (above canopy) and the net precipitation (below canopy), being the latter the sum of the throughfall (part of the precipitation that reaches the soil through its vegetation) and stemflow (water of rain that slides by its branches and the trunk until it reaches the soil at the tree foot).

Rainfall interception by the canopy depends on the characteristics of the rainfall, the meteorological conditions, vegetation structure and the interactions between these factors.

In this work, the variation of rainfall interception under different weather conditions has been analyzed in two different species, a tree (*Pinus pinea*) and a shrub (*Cistus ladanifer*). The study was aimed at determining the proportions of throughfall, stemflow and interception in these species, and also to analyze the impact of different climate and dasometric variables on the interception variability. Likewise, the applicability of the different rainfall interception models in the selected isolated individuals of these typical Mediterranean species has been analyzed.

Data collection was conducted in experimental plots located in "El Cabril" basin, in the municipality of Hornachuelos (Córdoba). The study area is located in the upper course of Bembezar River (elevation between 500 and 700 metres) in Sierra Albarrana mountains. In order to measure the incident precipitation, three tilting cup rain gauges have been installed which record data every 10 minutes. In addition, there is a weather station located on the study area close to the experimental plots, which records weather data. With the aim to develop a detailed study of the hydrologic cycle, a morphological characterization of the selected individuals has been done, as well as measures of

moisture of canopy and moisture of the soil were taken, and the estimation of parameters like the leaf area index (LAI), using hemispherical photographs, and or the normalized difference vegetation index (NDVI).

The water balance in trees or shrubs is carried out on an experimental basis using rain gauges to collect the water that goes beyond the canopy and stemflow collectors from different device surrounding the trunks.

The meteorological variables studied were precipitation (volume, intensity and duration), temperature and wind (direction and intensity). To determine which of these variables have a greater influence on the interception in each species, a multiple regression analysis was carried out.

Interception models has been also applied as an alternative option to estimate of these losses. This work carries out a comparison of several models commonly used in interception studies, such as the standard versions of the Rutter and Gash models, as well as the Valente's adaptation of these models to sparse vegetation.

With this work a detailed characterization of the influence of forest vegetation on the processes of interception and redistribution of precipitation was carried out. In the studied species it has been determined the storage capacity and the canopy drying time, key parameters to define the rain events in the interception models. There is a large seasonal and annual variability of these parameters. This variability is reflected in the same way in interception capacity. To sum up, trees store large volumes of precipitation, almost the double than shrub. In general vegetation generates high interception losses that may affect water availability in water scare regions.

RESUMEN

La interceptación es la fracción de precipitación bruta que no alcanza el suelo, y que, tras haber sido retenida por el dosel o el fuste, vuelve a la atmósfera por evaporación. Estas pérdidas por interceptación constituyen un componente importante de la precipitación bruta, y es necesario conocer su valor para precisar mejor el papel de la cubierta forestal en el balance hídrico. De ahí la necesidad de realizar un estudio de los parámetros que influyen sobre la interceptación de la lluvia por la cubierta vegetal.

En nuestro caso, la cantidad de agua interceptada ha sido estimada mediante la diferencia entre la precipitación bruta (por encima de dosel) y la neta (por debajo de dosel), siendo esta última la suma de trascolación (parte de la precipitación que alcanza el suelo a través de la vegetación) y esorrentía cortical (agua de lluvia que resbala por las ramas y el tronco hasta alcanzar el suelo por la base del árbol).

La interceptación de lluvia por el follaje depende de las características de las lluvias, las condiciones meteorológicas, la estructura de la vegetación y las interacciones entre estos factores.

En este trabajo se ha estudiado la variación de la interceptación en dos especies vegetales diferentes, una arbórea (*Pinus pinea*) y otra arbustiva (*Cistus ladanifer*), bajo diferentes condiciones climáticas, con el objetivo de determinar las proporciones de trascolación, esorrentía cortical e interceptación en estas especies y estudiar el efecto de las diferentes variables climáticas y dasométricas sobre la variabilidad de la interceptación. De forma análoga, se ha analizado la aplicabilidad de los diferentes modelos de interceptación de lluvia en los individuos aislados seleccionados de estas especies de clima mediterráneo.

La toma de datos se ha realizado en parcelas experimentales situadas en la cuenca hidrológica de “El Cabril”, en el municipio de Hornachuelos (Córdoba). El área de estudio se encuentra en el curso superior del río Bembézar, a una altitud de 500-700 metros en la Sierra Albarrana. Para medir la precipitación incidente se han instalado tres pluviómetros de cazoleta basculante que registran datos cada 10 minutos. Además se dispone de una estación meteorológica situada en la misma finca de estudio a escasa distancia de las parcelas experimentales, que registra datos climáticos con una

frecuencia horaria. Para proceder a un estudio más detallado del ciclo hidrológico se ha realizado la caracterización morfológica de los individuos seleccionados, así como medidas de humedad del dosel y de humedad del suelo bajo el mismo, y la estimación de diversos parámetros como el índice de área foliar (*IAF*), mediante el uso de fotografías hemisféricas, y el NDVI.

El balance hídrico en árboles o arbustos se lleva a cabo de forma experimental mediante la utilización de pluviómetros que permiten coleccionar el agua que traspasa el dosel y de colectores de escorrentía cortical a partir de diferentes instrumentos que rodean los troncos de la plantas.

Las variables meteorológicas estudiadas han sido la precipitación (volumen, intensidad y duración), viento (intensidad y dirección) y temperatura. Para determinar cuál de estas variables ejerce una mayor influencia sobre la interceptación en ambas especies, se ha realizado un análisis de regresión múltiple estimándose, posteriormente, las variables con mayor peso en el cálculo de la interceptación.

También se han aplicado modelos de interceptación que proporcionan un medio alternativo para la estimación de estas pérdidas. En este trabajo se realiza una comparación de varios modelos comúnmente utilizados en estudios de interceptación, como son las versiones clásicas de los modelos de Rutter y de Gash, además de la versión adaptada por Valente de estos modelos a vegetación dispersa.

El trabajo realizado ha permitido caracterizar los efectos de la vegetación sobre los procesos de interceptación y redistribución de la precipitación. Se han determinado en ambas especies la capacidad de almacenamiento y el tiempo de secado del dosel, parámetros clave en los modelos de interceptación a la hora de definir los eventos de lluvia. Se observa una gran variabilidad anual y estacional de estos parámetros. Esta variabilidad se refleja de igual modo en la capacidad de interceptación. En resumen, los árboles almacenan grandes volúmenes de precipitación, casi el doble que los arbustos, y la vegetación, en general, genera pérdidas por interceptación elevadas que, por tanto, puede afectar a la disponibilidad de agua en una región donde es un recurso escaso.

ÍNDICE GENERAL

SUMMARY..... xv

RESUMEN xvii

ÍNDICE GENERAL..... xix

ÍNDICE DE FIGURAS xxiii

ÍNDICE DE TABLASxxix

GLOSARIO DE SÍMBOLOS.....xxxiii

1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES1

 1.1. Justification1

 1.2. Objectives.....3

 1.2.1. General objective.....3

 1.2.2. Specific objectives.....3

 1.3. Document outline.....4

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS5

 1.1. Justificación5

 1.2. Objetivos7

 1.2.1. Objetivo general.....7

 1.2.2. Objetivos específicos.....7

 1.3. Esquema del documento8

2. MARCO TEÓRICO 11

 2.1. Importancia de la interceptación11

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

2.2.	Antecedentes	13
2.3.	Estudios de la interceptación en España	16
2.4.	Métodos de medida de la interceptación	17
2.5.	Modelos de interceptación	19
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1.	Descripción de la zona de estudio	23
3.1.1.	Localización geográfica.....	23
3.1.2.	Clima de la zona	24
3.1.3.	Red fluvial	25
3.1.4.	Hidrogeología.....	27
3.1.5.	Topografía.....	29
3.1.6.	Vegetación	29
3.2.	Selección de especies	32
3.2.1.	<i>Pinus pinea</i>	32
3.2.2.	<i>Cistus ladanifer</i>	37
3.3.	Medición de los componentes de la interceptación	39
3.3.1.	Precipitación	39
3.3.2.	Trascolación	42
3.3.3.	Escorrentía cortical	46
3.4.	Equipos de medición.....	48
3.4.1.	Caracterización morfológica	48
3.4.2.	Índice de Área Foliar	51

ÍNDICE GENERAL

3.4.3.	NDVI	60
3.4.4.	Humedad del dosel	61
3.4.5.	Humedad de suelo	62
3.4.5.	Datos meteorológicos	65
3.5.	Análisis de la modelación.....	66
3.5.1.	Modelo de Rutter.....	66
3.5.2.	Modelo de Gash.....	68
3.5.3.	Modelo de Gash revisado.....	70
3.5.4.	Modelos de Valente et al. (1997).....	71
3.5.5.	Determinación de parámetros.....	75
3.5.6.	Mejoras metodológicas realizadas en esta tesis.....	78
3.5.7.	Validación de modelos	82
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	85
4.1.	Influencia de las características climáticas sobre la interceptación	85
4.1.1.	Medidas de precipitación	85
4.1.2.	Medidas de interceptación.....	88
4.1.3.	Medidas de escorrentía cortical	92
4.1.4.	Medidas de trascolación.....	94
4.1.5.	Relación entre diferentes características de la lluvia y la interceptación	95
4.1.6.	Relación entre diferentes variables climáticas y la interceptación.....	100
4.1.7.	Variabilidad anual y estacional de la interceptación	108
4.2.	Influencia de las características de la vegetación sobre la interceptación	112

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

4.2.1.	Parámetros de influencia sobre los componentes de partición de la lluvia	112
4.2.2.	Estudio de los parámetros de influencia sobre la escorrentía cortical. ...	113
4.2.3.	Estudio de los parámetros de influencia sobre la trascolación.....	122
4.2.4.	Estudio de los parámetros de influencia sobre la interceptación.....	128
4.2.5.	Modelo de regresión NDVI-IAF.....	134
4.2.6.	Estudio de la influencia del dosel sobre la humedad del suelo.....	136
4.3.	Modelos de interceptación	138
4.3.1.	Estimación de parámetros.....	138
4.3.2.	Independencia de eventos para la determinación de la interceptación. Tiempo de secado del dosel (<i>CDT</i>).....	149
4.3.3.	Modelación de la interceptación	154
4.3.4.	Validación de modelos de interceptación de lluvia	156
4.3.5.	Simulación del proceso de interceptación de lluvia.....	164
5.	CONCLUSIONS	169
5.1.	General conclusions.....	169
5.2.	Future research	172
5.	CONCLUSIONES	174
5.1.	Conclusiones generales.....	174
5.2.	Líneas futuras de investigación	178
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	179
7.	ANEJOS.....	203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Localización de algunas áreas en las que se han realizado estudios de interceptación.....	17
Figura 3.1. Situación de la cuenca de El Cabril en la provincia de Córdoba.....	23
Figura 3.2. Mapa de la red fluvial de "El Cabril" (realización propia)	26
Figura 3.3. Mapa de subcuencas de drenaje de "El Cabril" (realización propia)	28
Figura 3.4. Mapa topográfico de "El Cabril"	30
Figura 3.5. Distribución de la especie <i>Pinus pinea</i> en la cuenca mediterránea. Fuente: Fady et al. (2004)	33
Figura 3.6. Mapa de vegetación de "El Cabril"	34
Figura 3.7. Localización de los ejemplares de <i>Pinus pinea</i> estudiados.....	35
Figura 3.8. <i>Pinus pinea</i> (P _{M2}) seleccionado en la zona del Arroyo Los Morales	36
Figura 3.9. Localización de la zona experimental de <i>Cistus ladanifer</i>	38
Figura 3.10. Ejemplar de <i>Cistus ladanifer</i> (J2) seleccionado en la Subcuenca 1	39
Figura 3.11. Pluviómetro Eijkelkamp instalado junto a los ejemplares de <i>Pinus pinea</i> (a) y <i>Cistus ladanifer</i> (b).....	40
Figura 3.12. Pluviómetro Decagon instalado en la zona antropizada	40
Figura 3.13. Pluviómetros manuales	41
Figura 3.14. Pluviómetros de embudo.....	41
Figura 3.15. Instrumentación inicial empleada para la medida de la trascolación en <i>Pinus pinea</i> (P _{M1}).....	42
Figura 3.16. Detalle de una de las canaletas empleadas para la medida de la trascolación	43
Figura 3.17. Instrumentación empleada actualmente para la medida de la trascolación en los ejemplares de <i>Pinus pinea</i> ubicados en la zona del Arroyo los Morales	44

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Figura 3.18. Instrumentación para la medida de la trascolación en <i>Pinus pinea</i> ubicados en la zona antropizada	45
Figura 3.19. Detalle del embudo utilizado para la medida de la trascolación en <i>Pinus pinea</i>	45
Figura 3.20. Instrumentación de un ejemplar de <i>Cistus ladanifer</i> (J1).....	46
Figura 3.21. Instrumentación para la medida de la escorrentía cortical en <i>Pinus pinea</i>	47
Figura 3.22. Instrumentación para la medida de la escorrentía cortical en <i>Cistus ladanifer</i> (J2).....	47
Figura 3.23. Medidas dasométricas realizadas en los individuos elegidos.....	48
Figura 3.24. Medida de las características del árbol mediante fotografía	49
Figura 3.25. Dosel elipsoidal	50
Figura 3.26. Cámara digital Canon D300 equipada con ojo de pez	53
Figura 3.27. Ejemplo de imágenes tomadas con lente hemisférica en <i>Pinus pinea</i> (P_{M1})	53
Figura 3.28. Hoja de datos para el etiquetado de las fotografías hemisféricas.....	55
Figura 3.29. Serie de imágenes tomadas en varias posiciones utilizando una tapa perforada. En este caso, se consideraron dos agujeros.....	56
Figura 3.30. Esquema del diseño experimental (Fuente Weiss y Baret, 2014).....	57
Figura 3.31. Ejemplo de una imagen del diseño experimental tomada con la cámara hemisférica utilizada para la calibración de la función de proyección. La línea amarilla horizontal se corresponde con el diámetro de la imagen que pasa por el centro óptico	57
Figura 3.32. Resultado de la calibración de la lente ojo de pez	58
Figura 3.33. Medida del <i>IAF</i> con el ceptómetro LP-80 en <i>Pinus pinea</i>	59
Figura 3.34. Instrumentación para la medida del <i>NDVI</i> en <i>Pinus pinea</i> (P_{M1}).....	61
Figura 3.35. Esquema de los sensores de humedad instalados en <i>Pinus pinea</i>	61
Figura 3.36. Sensor de humedad instalado en <i>Pinus pinea</i> (P_{M1})	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.37. Sensores de humedad instalados en <i>Pinus pinea</i> (P_{M2})	62
Figura 3.38. Sensores de humedad instalados en <i>Cistus ladanifer</i>	63
Figura 3.39. Muestra de suelo para la calibración de los sensores de humedad.....	64
Figura 3.40. Estación meteorológica instalada en la zona del Arroyo de los Morales	65
Figura 3.41. Esquema del modelo de Rutter.....	68
Figura 3.42. Esquema del modelo de Rutter Sparse (a partir de Valente et al. (1997))	73
Figura 3.43. Adaptación del modelo de Rutter	80
Figura 3.44. Adaptación del modelo de Rutter Sparse	81
Figura 4.1.1. Cantidades mensuales de precipitación (P , mm)	85
Figura 4.1.2. Distribución de frecuencias (porcentaje del volumen total de las precipitaciones y del número de eventos de lluvia) según la cantidad (a), intensidad (b) y duración (c) del evento de lluvia y de la velocidad del viento (d)	87
Figura 4.1.3. Relaciones entre la intensidad de interceptación (%) y la precipitación (mm) en <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i>	91
Figura 4.1.4. Relación entre las medidas de escorrentía cortical y la precipitación en <i>Pinus pinea</i> (a) y <i>Cistus ladanifer</i> (b).....	93
Figura 4.1.5. Relación entre las medidas de trascolación y la precipitación en <i>Pinus pinea</i> (a) y <i>Cistus ladanifer</i> (b)	95
Figura 4.1.6. Media de los porcentajes de trascolación, escorrentía cortical e interceptación para cuatro clases de lluvia bruta durante el período de octubre de 2010 a julio de 2015 en <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i>	96
Figura 4.1.7. Relaciones entre la interceptación (%) y duración de las precipitaciones (h) para diferentes intervalos de intensidad de las lluvias en <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i>	98
Figura 4.1.8. Relaciones entre la interceptación (mm) y cantidad de precipitación (mm) para diferentes intervalos de intensidad de las lluvias en <i>Pinus pinea</i>	99

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Figura 4.1.9. Porcentaje de trascolación, escorrentía cortical e interceptación en función de la cantidad (A), intensidad (B) y duración (C) de las precipitaciones en <i>Pinus pinea</i> (1) y <i>Cistus ladanifer</i> (2).....	101
Figura 4.1.10. Porcentaje de trascolación, escorrentía cortical e interceptación en función de la temperatura (D), velocidad (E) y dirección (F) del viento en <i>Pinus pinea</i> (1) y <i>Cistus ladanifer</i> (2).....	102
Figura 4.1.11. Cantidad de precipitación según la dirección del viento durante el período de estudio	103
Figura 4.1.12. Relación entre Interceptación (mm) y Precipitación (mm) en <i>Pinus pinea</i> (a) y <i>Cistus ladanifer</i> (b) en cada estación del año	110
Figura 4.2.2. Correlación entre la S_f (%) y la $h_{\text{árbol}}$	114
Figura 4.2.2. Correlación entre la S_f (%) y la h_{fuste}	115
Figura 4.2.3. Correlación entre la S_f (%) y el DBH.....	115
Figura 4.2.4. Correlación entre la S_f (%) y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$	116
Figura 4.2.5. Correlación entre la S_f (%) y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$	117
Figura 4.2.6. Correlación entre la S_f (%) y la h_{copa}	117
Figura 4.2.7. Correlación entre la S_f (%) y el A_{copa}	118
Figura 4.2.8. Correlación entre la S_f (%) y el V_{copa}	118
Figura 4.2.9. Relación entre el Funneling ratio (FR) y la precipitación (mm) en <i>Pinus pinea</i> (a) y <i>Cistus ladanifer</i> (b)	120
Figura 4.2.10. Correlación entre la S_f (%) y el FR.....	121
Figura 4.2.11. Correlación entre la S_f (%) y el IAF.....	122
Figura 4.2.12. Correlación entre la Tr (%) y la $h_{\text{árbol}}$	123
Figura 4.2.13. Correlación entre la Tr (%) y la h_{fuste}	123
Figura 4.2.14. Correlación entre la Tr (%) y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$	124

Figura 4.2.15. Correlación entre la Tr (%) y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$	124
Figura 4.2.16. Correlación entre la Tr (%) y el DBH	125
Figura 4.2.17. Correlación entre la Tr (%) y la h_{copa}	126
Figura 4.2.18. Correlación entre la Tr (%) y el A_{copa}	126
Figura 4.2.19. Correlación entre la Tr (%) y el V_{copa}	127
Figura 4.2.20. Correlación entre la Tr (%) y el IAF	128
Figura 4.2.21. Correlación entre la I (%) y la $h_{\text{árbol}}$	129
Figura 4.2.22. Correlación entre la I (%) y la h_{fuste}	129
Figura 4.2.23. Correlación entre la I (%) y la $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$	130
Figura 4.2.24. Correlación entre la I (%) y la $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$	131
Figura 4.2.25. Correlación entre la I (%) y el DBH	131
Figura 4.2.26. Correlación entre la I (%) y la h_{copa}	132
Figura 4.2.27. Correlación entre la I (%) y el A_{copa}	133
Figura 4.2.28. Correlación entre la I (%) y el V_{copa}	133
Figura 4.2.29. Correlación entre la I (%) y el IAF	134
Figura 4.2.30. Correlación entre NDVI y el IAF	135
Figura 4.2.31. Valores de NDVI, IAF y P durante el periodo Febrero 2015-Abril 2016.....	136
Figura 4.2.32. Incremento de la humedad del suelo para cada evento de precipitación en <i>Pinus pinea</i> (a) y <i>Cistus ladanifer</i> (b)	137
Figura 4.3.1. Relación entre Tr y P en <i>Pinus pinea</i> (P_{M1} y P_{M2}) y <i>Cistus ladanifer</i> (J1)	141
Figura 4.3.2. Relación entre I y P en <i>Pinus pinea</i> (P_{M1} y P_{M2}) para los eventos $P < P_s$ (a) y $P \geq P_s$ (b).....	143
Figura 4.3.3. Relación entre I y P en <i>Cistus ladanifer</i> (J1) para los eventos $P < P_s$ (a) y $P \geq P_s$ (b). 143	
Figura 4.3.4. Relación entre S_f y P en <i>Pinus pinea</i> (P_{M1} y P_{M2})	145

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Figura 4.3.5. Relación entre S_f y P en <i>Cistus ladanifer</i> (J1).....	146
Figura 4.3.6. Relación entre S_f y $Tr-(1-c)P$ en <i>Pinus pinea</i> (P_{M1} y P_{M2})	147
Figura 4.3.7. Relación entre S_f y $Tr-(1-c)P$ en <i>Cistus ladanifer</i> (J1)	147
Figura 4.3.8. Relación entre los valores de CDT obtenidos por los sensores LWS y P en <i>Pinus pinea</i>	152
Figura 4.3.9. Valores mensuales de CDT obtenidos por los sensores LWS y por el modelo de Rutter en <i>Pinus pinea</i>	152
Figura 4.3.10. Correlación entre los valores de CDT obtenidos con el modelo de Rutter y la precipitación.....	153
Figura 4.3.11. Correlación entre los valores de CDT obtenidos con el modelo de Rutter y la evaporación.....	153
Figura 4.3.12. Valores de CDT obtenidos por los sensores LWS en función de la hora en la que finaliza el evento de precipitación en <i>Pinus pinea</i>	154
Figura 4.3.13. Interceptación calculada mediante modelos frente a la interceptación observada en los ejemplares estudiados	161
Figura 4.3.14. Interceptación acumulada para valores registrados y simulados	162
Figura 4.3.15. Sensibilidad de la interceptación a diferentes parámetros del modelo de Rutter original en <i>Pinus pinea</i> (a) y del modelo de Gash original en <i>Cistus ladanifer</i> (b).....	163
Figura 4.3.16. Evaporación potencial y precipitación incidente para el año 2014	164
Figura 4.3.17. Flujos de agua acumulados simulados en <i>Pinus pinea</i> para el año 2014	167
Figura 4.3.18. Flujos de agua acumulados simulados en <i>Cistua ladanifer</i> para el año 2014....	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Porcentaje de Interceptación (1) y capacidad de almacenamiento del dosel (2) en diferentes especies de pinos y arbustos de ambiente Mediterráneo. Algunos estudios no tienen datos de la capacidad de almacenamiento del dosel y en tal caso se indica con las siglas N/A.....	15
Tabla 3.1. Biogeografía de la zona donde se ubica la cuenca	31
Tabla 3.2. Etapas de Regresión y Bioindicadores. Serie 24c.Hc	32
Tabla 3.3. Características de los ejemplares de <i>Pinus pinea</i> estudiados	36
Tabla 3.4. Características de los ejemplares de <i>Cistus ladanifer</i> estudiados.....	38
Tabla 3.5. Componentes del modelo de interceptación de lluvia de Gash	69
Tabla 3.6. Componentes del modelo de interceptación de lluvia revisado Gash (1995)	71
Tabla 3.7. Componentes del modelo de interceptación de Gash Sparse (Valente et al., 1997)	74
Tabla 3.8. Estadísticos y sus expresiones matemáticas.....	82
Tabla 4.1.1. Valores anuales de las medidas acumuladas de precipitación bruta, trascolación, escorrentía cortical e interceptación registradas durante el período de Octubre de 2010 a Julio de 2015 en los individuos de <i>Pinus pinea</i> de la zona del Arroyo Los Morales	88
Tabla 4.1.2. Valores anuales de las medidas acumuladas de precipitación bruta, trascolación, escorrentía cortical e interceptación registradas durante el período de Octubre de 2010 a Julio de 2015 en <i>Cistus ladanifer</i>	89
Tabla 4.1.3. Valores anuales de las medidas acumuladas de precipitación bruta, trascolación e interceptación para el período de Septiembre de 2014 a Julio de 2015 en los individuos de <i>Pinus pinea</i> de la zona antropizada	90
Tabla 4.1.4. Coeficientes de correlación lineal	103
Tabla 4.1.5. Regresión lineal múltiple obtenida por el método BSR en <i>Pinus pinea</i>	106
Tabla 4.1.6. Regresión lineal múltiple obtenida por el método BSR en <i>Cistus ladanifer</i>	106

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 4.1.7. Regresión lineal múltiple obtenida por el método SLR en <i>Pinus pinea</i>	107
Tabla 4.1.8. Regresión lineal múltiple obtenida por el método SLR en <i>Cistus ladanifer</i>	108
Tabla 4.1.9. Variabilidad anual de la capacidad de interceptación y de almacenamiento entre años secos (naranja) y años lluviosos (azul)	109
Tabla 4.1.10. Variabilidad estacional de la capacidad de almacenamiento del dosel en <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i>	110
Tabla 4.2.1. Datos para la correlación entre el porcentaje de S_f y las características morfológicas.....	113
Tabla 4.2.2. Valores del funneling ratio de los ejemplares de <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i> . Entre paréntesis se muestra la desviación estándar.	119
Tabla 4.2.3. Valores del <i>IAF</i> de los ejemplares de <i>Pinus pinea</i>	121
Tabla 4.2.4. Datos para la correlación entre el porcentaje de Tr y las características morfológicas.....	122
Tabla 4.2.5. Datos para la correlación entre el porcentaje de l y las características morfológicas.....	128
Tabla 4.3.1. Valores estimados de los parámetros por el método de Saxena para las especies <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i>	142
Tabla 4.3.2. Valores estimados de los parámetros por el método de Klassen para las especies <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i>	144
Tabla 4.3.3. Valores estimados de los parámetros por el método de Gash para las especies <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i>	144
Tabla 4.3.4. Valores estimados de los parámetros para las especies <i>Pinus pinea</i> y <i>Cistus ladanifer</i>	149
Tabla 4.3.5. Valores estacionales de <i>CDT</i> obtenidos por los sensores LWS y estimados por el modelo de Rutter en <i>Pinus pinea</i>	154

Tabla 4.3.6. Comparación de los modelos de interceptación de lluvia en los diferentes ejemplares estudiados	155
Tabla 4.3.7. Comparación de cada una de las variables simuladas por los modelos de interceptación con los valores registrados (%) en los diferentes ejemplares estudiados	156
Tabla 4.3.8. Estadísticos de las variables hidrológicas analizadas en función de la precipitación incidente en <i>Pinus pinea</i> ($P_{M1} - P_{M2}$)	157
Tabla 4.3.9. Estadísticos de las variables hidrológicas analizadas en función de la precipitación incidente en <i>Cistus ladanifer</i> (J1).....	158
Tabla 4.3.10. Relaciones estadísticas entre valores observados y simulados de interceptación.....	159
Tabla 4.3.11. Coeficientes de regresión lineal entre valores observados y simulados para modelos de interceptación de lluvias	160
Tabla 4.3.12. Estadísticos de flujos de agua en <i>Pinus pinea</i> con el modelo original de Rutter para el año 2014	165
Tabla 4.3.13. Estadísticos de flujos de agua en <i>Cistus ladanifer</i> con el modelo original de Gash para el año 2014	166

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

Simbología	Descripción	Unidades
b	Coeficiente de drenaje del modelo de Rutter	-
C	Cantidad de agua almacenada en el dosel	mm
C_t	Cantidad de agua almacenada en el fuste	mm
CDT	Tiempo de secado del dosel	h
c	Proporción relativa de área cubierta	%
c_p	Calor específico del aire a presión constante	J Kg ⁻¹ °C ⁻¹
D	Tasa de drenaje del dosel	mm min ⁻¹
D_0	Tasa de drenaje cuando $C=S$	mm min ⁻¹
$D_{i,c}$	Tasa de goteo en la fracción cubierta del dosel	mm h ⁻¹
$D_{t,c}$	Tasa de goteo en la fracción cubierta del tronco	mm h ⁻¹
E_c	Tasa de evaporación que se produce en el dosel	mm h ⁻¹
E_p	Evaporación potencial	mm h ⁻¹
E_t	Tasa de evaporación que se produce que se produce en el fuste	mm h ⁻¹
\bar{E}	Intensidad media de evaporación	mm h ⁻¹
\bar{E}_c	Intensidad media de evaporación en la fracción cubierta del dosel	mm h ⁻¹
I	Intercepción	mm
IAF	Índice de Área Foliar	m ² m ⁻²
$NDVI$	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	-
P_g	Precipitación incidente	mm
P_s	Precipitación necesaria para saturar el dosel	mm
p	Coeficiente de trascolación libre	-
p_d	Coeficiente de partición de drenaje	-
p_t	Coeficiente de escorrentía cortical libre	-
R	Intensidad de precipitación	mm h ⁻¹
\bar{R}	Intensidad media de precipitación	mm h ⁻¹
R_N	Radiación neta	MJ m ⁻² d ⁻¹
r_a	Resistencia aerodinámica	s m ⁻¹
S	Capacidad de almacenamiento del dosel	mm
S_c	Capacidad de almacenamiento de la fracción cubierta del dosel	mm

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

S_f	Escorrentía cortical	mm
S_t	Capacidad de retención de agua en el tronco	mm
$S_{t,c}$	Capacidad de retención de agua en el tronco de la fracción cubierta del dosel	mm
Tr	Trascolación	mm
u_z	Velocidad del viento a una altura z	$m s^{-1}$
θ	Humedad volumétrica del suelo	-
ε	Proporción entre el agua evaporada desde el follaje con la evaporada desde los troncos	-

CHAPTER 1

INTRODUCTION AND OBJECTIVES

1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES

1.1. Justification

The interception of the rainfall by the tree canopy is one of the most important hydrological processes of an ecosystem. However, the mechanisms of this process are not well known yet (Li et al., 2016). The losses of precipitation water by interception may have a strong impact on the water balance of the basins (Ward and Robinson, 2000; Sadeghi et al., 2015). In the classical concepts of hydrology interception process was not a relevant component in the hydrological cycle, it was included into other processes or even disregarded. Furthermore, as its quantification is laborious, and it is not easy to obtain a representative value of interception, this process was not studied in detail (Mendez Monroy, 2013).

For a long time, interception has been expressed by empirical regression equations, which has been criticized for not taking into account either the precipitation duration or intensity, or the number of rain events that took place in the same record (Jackson, 1975; Herbst et al., 2006). This type of expressions represents characteristics and conditions that are common in the place where happened, so it does not allow us to extrapolate the obtained values to forests with different characteristics or different climate (Belmonte Serrato and Romero Diaz, 1998). The use of simulation models can help a lot in order to solve this problem.

Subsequent investigations of the rainfall interception process (Calder, 1986; Gash et al., 1995; Gash, 1979; Gerrits et al., 2010; Pereira et al., 2009; Valente et al., 1997; Xiao et al., 2000a) have stressed the importance of studying this process through the development and application of physical, analytical and stochastic models, showing that interception is a dynamic process.

The rainfall interception models allow us to study this process with the integration of the features of the plant structure, the weather conditions in the area, and besides this, it allows to see in detail how the physical processes happen during the process, allowing to change the paradigm of estimating interception as a constant fraction of incident precipitation. The obtained results could be extrapolated to other larger areas, contributing to the understanding of all the processes occurring in the interception process (Muzylo et al., 2009).

The forestry ecosystem of our studied area, the “*dehesa*”, is typical of the western Iberian Peninsula, derived from the Mediterranean forest and formed by isolated tree species from *Quercus* (oak, cork oak) or other species such as beech or pine, mixed with bushes and herbaceous deciduous vegetation (Mateos Rodriguez and Schnabel, 2009). These scattered forests are particularly important given its dominant distribution in the arid and semiarid areas, where water resources are limited (Stewart, 2004; Pereira et al., 2009). In “*dehesa*” areas like ours, canopy cover is discontinuous, so there is a great variability in the relationship between rainfall and interception (David et al., 2006; Llorens et al., 2011). This generates a major complexity in its study (Guevara-Escobar et al., 2007; Rodriguez and Leco Mateos, 2010), since there is no uniform spatial relationship of the interception.

The interception is controlled by three groups of variables (Xiao et al., 2000a; Gerrits and Savenije, 2011): precipitation, canopy structure and meteorological characteristics. However, the available information on the interaction of these variables with interception is contradictory. For instance, there is no consensus on the effect of the rain intensity, since some studies suggest that interception increases with the intensity of rain due to the gradual saturation of the canopy (Keim et al., 2006), whereas others show that greater rain rates result in lower interception because the water cannot be stored in leaves and branches, as the canopy is shaken by these heavy rainfalls (Wang et al., 2007). There are also difficulties in establishing relations of interception with the characteristics of the canopy, as for example, in studies of large forests or isolated mature trees, you cannot easily measure many of the characteristics of the structure (leaf area, biomass, inclination of the branches, foliage density, etc.) (Levia et al., 2015). As a result, the relationship between the characteristics of the canopy and the interception is not clearly defined (Nanko et al, 2011; Li et al., 2016.).

Previous studies have shown that in a scattered forest, the amount of interception loss is more sensitive to climate parameters (Loustau et al., 1992; Chen and Li, 2015). Canopy architecture (length, density and width), the leaf area index (LAI) and the angular distribution of the branches, and even the characteristics of the leaves surface (for example, waxy or downy), are contributing factors to the interception variability among different species (Levia et al., 2015). All this, together with the verified fact that in similar climatic conditions the amount of rainfall interception mainly depends on the

storage capacity of the canopy (Samba et al., 2001), justifies a detailed study at a level of isolated individuals, which will make possible to measure accurately the interception and a further investigation of the mechanisms involved in this process.

The estimation of the loss interception in isolated trees has only been tried in some studies (Dancette and Poulain, 1969; Calabuig, 1992; King and Harrison, 1998; Xiao et al., 2000b; Samba et al., 2001; Gómez et al., 2001, 2002; Nanko et al., 2011; Fathizadeh et al., 2013; Livesley et al., 2014). The findings were obtained in all cases of a small number of rain events, and were never reported accumulated and continued results during seasons or whole years (David et al., 2006).

1.2. Objectives

1.2.1. General objective

In this work, a study in detail of the interception process has been performed, estimating the amount and the rain distribution that takes place through a bush canopy (*Cistus ladanifer*) and a tree canopy (*Pinus pinea*), both experimentally and, also, through the application of different simulation models of this process.

1.2.2. Specific objectives

In this paper, the following specific objectives were treated:

- To get the water balance of interception flows in two representative species of the semiarid Mediterranean forest and shrub, present in our study area (Hornachuelos, Córdoba): *Pinus pinea* and *Cistus ladanifer*.
- To relate the weather characteristics of the study area with the rainfall interception, and to study the seasonal and annual variability of vegetation interception.
- To characterize morphologically the selected individuals for the study and, from the field obtained data, establish relationships between dasometric characteristics and the rainfall interception.
- To apply and calibrate the Rutter model (Rutter et al, 1971; Rutter et al., 1975), the Gash model (Gash et al., 1995) and the reformulated versions by Valente et al. (1997), in isolated individuals from *Pinus pinea* and *Cistus ladanifer*, improving its application in our climatic and vegetation conditions.

1.3. Document outline

In Chapter 1, the work done is justified and the central questions of the thesis, introduction and the objectives are exposed. Chapter 2 begins with a contextualization of the interception process, seen as an important component of the hydrological cycle, performing a review of the status of the investigation of this process in environments with Mediterranean climate and, more specifically, studies made in Spain. Once the hydrological components implicit in this process are defined, they are studied in detail and the estimation and recording methods commonly used are analyzed. This chapter ends with an introduction to interception models.

In Chapter 3, the two species in which this study is developed are presented. Both species (*Pinus pinea* and *Cistus ladanifer*) were selected as the most representative of the study area. Later, a presentation of the different measurement equipments installed, and the methodology followed in this work to obtain the different components of interception (precipitation, throughfall and stemflow) are described. Finally, the chapter ends with the presentation of rainfall interception models used in this work, which highlight for their wide application and predictability. Two types of models are tackled, the model physically based of Rutter and the analytical of Gash, as well as modified versions of Valente models. A detailed presentation of the theoretical basis and its operation for each one was performed.

The obtained results in this research, as well as a discussion of them, are presented in Chapter 4. The followed steps were emphasized and a description of the methods used during the work was made. Three subchapters are presented: influence of climatic characteristics on the interception effect of vegetation, characteristics in the interception process, and finally, a methodology that allows to implement rainfall interception models.

The conclusions and recommendations of this research are included in Chapter 5.

Finally, in Chapter 6, the references used in this work are detailed.

A last chapter with Annexes, chapter 7, has been incorporated with field data and other information that is not included in it corresponding chapter.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Justificación

La interceptación de la precipitación por el dosel de un árbol es uno de los procesos hidrológicos más importantes de un ecosistema, sin embargo, los mecanismos de este proceso aún no se conocen bien (Li et al., 2016). Las pérdidas de agua de la interceptación pueden generar un fuerte impacto en el balance hídrico de las cuencas (Ward y Robinson, 2000; Sadeghi et al., 2015), no obstante, en los conceptos clásicos de hidrología el proceso de interceptación era un componente no relevante en el ciclo hidrológico, siendo incorporado a otros procesos o incluso despreciándose. Además dado que su cuantificación es laboriosa, y no es fácil obtener un valor representativo de la interceptación, este proceso no se estudiaba en detalle (Méndez Monroy, 2013).

Durante mucho tiempo se ha expresado la interceptación mediante ecuaciones empíricas de regresión, que han sido criticadas por no tener en cuenta ni la duración, ni la intensidad, ni el número de episodios de lluvia que tienen lugar en un mismo registro (Jackson, 1975; Herbst et al., 2006). Este tipo de expresiones representan características y condiciones propias de los lugares donde se realizan, lo que no siempre permite extrapolar los valores obtenidos a bosques con distintas características o diferente clima (Belmonte Serrato y Romero Díaz, 1998). El uso de modelos de simulación para estimar la interceptación puede ser de gran ayuda de cara a solucionar este problema.

Investigaciones posteriores del proceso de interceptación de lluvia (Calder, 1986; Gash et al., 1995; Gash, 1979; Gerrits et al., 2010; Pereira et al., 2009; Valente et al., 1997; Xiao et al., 2000a) han destacado la importancia del estudio de este proceso mediante la formulación y aplicación de modelos físicos, analíticos y estocásticos, demostrándose que la interceptación es un proceso dinámico.

Los modelos de interceptación de lluvia permiten estudiar este proceso integrando las características de la estructura de la planta, las condiciones meteorológicas de la zona, y además de esto, ver en detalle como suceden los procesos físicos que tienen lugar durante el mismo, permitiendo cambiar el paradigma de estimar la interceptación como una fracción constante de la precipitación incidente. Los resultados obtenidos del modelo de interceptación podrán ser extrapolados a otras áreas

más extensas, contribuyendo al entendimiento de todos los procesos que suceden en la interceptación (Muzylo et al., 2009).

El ecosistema forestal de nuestro área de estudio, la dehesa, es típico de la zona occidental de la Península ibérica, derivado del bosque mediterráneo, y constituido por especies arbóreas aisladas del género *Quercus* (encina, alcornoque) u otras especies como hayas o pinos, intercaladas con arbustos y vegetación herbácea no permanente (Mateos Rodríguez y Schnabel, 2009). Estos bosques dispersos son particularmente importantes dado su distribución dominante en las zonas áridas y semiáridas, donde los recursos hídricos son escasos (Stewart, 2004; Pereira et al., 2009). En zonas adehesadas como la nuestra, la cobertura del dosel es discontinua, existiendo una gran variabilidad en las relaciones entre la precipitación y la interceptación (David et al., 2006; Llorens et al., 2011), lo que genera una mayor complejidad en su estudio (Guevara-Escobar et al., 2007; Mateos Rodríguez y Leco, 2010), dado que no hay una relación espacial uniforme de la interceptación.

La interceptación está controlada por tres grupos de variables (Xiao et al., 2000a; Gerrits y Savenije, 2011): características de la precipitación, características de la estructura del dosel, y parámetros meteorológicos. Sin embargo, la información disponible sobre la interacción de la interceptación con estas variables es contradictoria. Por ejemplo, no hay consenso sobre el efecto de la intensidad de lluvia, ya que mientras algunos estudios sugieren que la interceptación aumenta con la intensidad de lluvia debido a la saturación gradual del dosel (Keim et al., 2006), otros demuestran que mayores intensidades de lluvia dan como resultado una menor interceptación debido a que el agua no se puede almacenar en las hojas y las ramas, ya que el dosel es agitado por estas lluvias intensas (Wang et al., 2007). También existen dificultades a la hora de establecer relaciones de la interceptación con las características del dosel, ya que por ejemplo en los estudios de grandes masas forestales o árboles aislados maduros, no se puede medir fácilmente muchas de las características de la estructura (área foliar, biomasa, inclinación de las ramas, densidad foliar, etc.) (Levia et al., 2015). Como resultado, la relación entre las características del dosel y la interceptación no está claramente definida (Nanko et al., 2011; Li et al., 2016).

Estudios anteriores han demostrado que en un bosque de árboles dispersos la cantidad de pérdida de interceptación es más sensible a los parámetros climáticos

1. Introducción y objetivos

(Loustau et al., 1992; Chen y Li, 2015). La arquitectura del dosel (longitud, densidad y anchura), el índice de área foliar y la distribución angular de las ramas, e incluso las características de la superficie de la hoja (por ejemplo, cerosa o pubescente), son factores que contribuyen a la variabilidad de la interceptación entre las diferentes especies (D. F. Levia et al., 2015). Todo esto junto con el hecho ya constatado de que, en condiciones climáticas similares, la cantidad de interceptación de la lluvia depende principalmente de la capacidad de almacenamiento del dosel (Samba et al., 2001), justifica un estudio detallado a nivel de individuos aislados que permitirá medir con precisión la interceptación e investigar más a fondo los mecanismos que intervienen en este proceso.

La estimación de la pérdida de la interceptación en árboles aislados sólo se ha intentado en algunos estudios (Dancette y Poulain, 1969; Calabuig, 1992; King y Harrison, 1998; Xiao et al., 2000b; Samba et al., 2001; Gómez et al., 2001, 2002; Nanko et al., 2011; Fathizadeh et al., 2013; Livesley et al., 2014). Las conclusiones fueron en todos los casos obtenidas de un pequeño número de eventos de lluvia, y nunca fueron reportados resultados acumulados y continuos durante temporadas o años enteros (David et al., 2006).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

En el presente trabajo se ha pretendido el estudio en detalle del proceso de interceptación, estimando la cantidad y distribución de agua de lluvia que tiene lugar a través de un dosel arbustivo (*Cistus ladanifer*) y otro arbóreo (*Pinus pinea*), tanto experimentalmente como a través de la aplicación de diferentes modelos de simulación de este proceso.

1.2.2. Objetivos específicos

En el presente trabajo se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Obtener el balance hídrico de los flujos de interceptación en dos especies representativas del bosque y matorral mediterráneo semiárido, presentes en nuestra zona de estudio (Hornachuelos, Córdoba): *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

- Relacionar las características climáticas de la zona de estudio con la interceptación de la lluvia, así como estudiar la variabilidad estacional y anual de la interceptación de la vegetación.
- Caracterizar morfológicamente los individuos seleccionados para su estudio y, a partir de los datos de campo obtenidos, establecer relaciones entre las características dasométricas y la interceptación de lluvia.
- Aplicar y calibrar el modelo de Rutter (Rutter et al., 1971; Rutter et al., 1975), el modelo de Gash (Gash et al., 1995), así como las versiones reformuladas por Valente et al. (1997), en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*, mejorando su aplicación en nuestras condiciones climáticas y de vegetación.

1.3. Esquema del documento

En el Capítulo 1 se justifica el trabajo realizado y se plantean las cuestiones centrales de la Tesis, la introducción y los objetivos. El Capítulo 2 se inicia con una contextualización del proceso de interceptación, visto como un componente importante dentro del ciclo hidrológico, realizando una revisión del estado de la investigación de este proceso en los ambientes con clima mediterráneo y, más concretamente, de los estudios realizados en España. Una vez definidos los componentes hidrológicos implícitos en este proceso, se estudia cada uno de ellos en detalle y se analizan los métodos de estimación y registro comúnmente utilizados. Este capítulo finaliza con una introducción a los modelos de interceptación.

En el Capítulo 3 se presentan las especies en las que se desarrolla el estudio y el entorno del que proceden. Las dos especies (*Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*) fueron seleccionadas por ser las más representativas de la zona de estudio. Se continúa con una presentación de los diferentes equipos de medida instalados y de la metodología seguida en este trabajo para obtener los diferentes componentes de la interceptación (precipitación, trascolación y escorrentía cortical). Finalmente, el capítulo termina con la presentación los modelos de interceptación de lluvia utilizados en este trabajo, que destacan por su amplia aplicación y predictibilidad. Se abordaron dos tipos de modelos, el modelo físicamente basado de Rutter y el analítico de Gash, así como las versiones modificadas por Valente de estos modelos. Para cada uno se realizó una presentación detallada de las bases teóricas y su funcionamiento.

1. Introducción y objetivos

Los resultados obtenidos de los objetivos planteados en ésta investigación, así como una discusión de los mismos, se presentan en el Capítulo 4. Se enfatiza en los pasos que se siguieron y cuáles fueron los métodos utilizados durante el trabajo. Se presentan 3 subcapítulos: influencia de las características climáticas sobre la interceptación, efecto de las características de la vegetación en el proceso de interceptación y, por último, se presenta una propuesta metodológica que permita implementar los modelos de interceptación de lluvias.

Las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de investigación se incluyen en el Capítulo 5.

Finalmente, en el Capítulo 6, se detalla la bibliografía utilizada en este trabajo.

Se ha incluido un último capítulo de Anejos, capítulo 7, en el que se presentan datos e información relevante que se cita en el documento pero que no procede presentarla en su capítulo.

***Modelación de la interceptación en individuos aislados de Pinus pinea y Cistus ladanifer:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación***

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Importancia de la interceptación

Cuando la lluvia incide sobre una superficie con vegetación, una parte es interceptada por la cubierta vegetal y evaporada directamente hacia la atmósfera. Esta parte de la lluvia se denomina pérdida por interceptación (I). El resto de la lluvia alcanza la superficie del suelo tanto de forma directa a través de huecos del dosel y goteando desde el mismo (trascolación, T_f) como escurriendo a través de las ramas principales y el tronco (escorrentía cortical, S_f). La cantidad real de agua que alcanza el suelo se denomina precipitación neta (P_n), y es la suma de la trascolación y la escorrentía cortical (Grifrio et al., 2014).

La vegetación tiene gran influencia en el ciclo hidrológico. Los árboles interceptan y almacenan la lluvia que cae sobre ellos para, posteriormente, ser evaporada hacia la atmósfera. La interceptación ejerce tres grandes efectos en el ciclo hidrológico: primero, actúa como reductor de lluvias; segundo, influye en la distribución espacial de la infiltración y, en consecuencia, en la humedad del suelo y en el flujo subsuperficial; por último, redistribuye la lluvia en el tiempo, mediante un tiempo de retardo no homogéneo (Gerrits et al., 2010).

La interceptación puede definirse como el volumen de agua interceptada que se evapora durante y después del evento. Otra opción es considerar la interceptación como un flujo (Ecuación 1.1), siendo igual a la suma del cambio en la capacidad de almacenamiento del dosel (S) y la evaporación que se produce desde el mismo (E) (Savenije, 2005):

$$I = \frac{dS}{dt} + E \quad (1.1)$$

La escala de tiempo del proceso de interceptación es del orden de un día, es decir, después de un día, se puede asumir en la mayoría de los climas que el primer término del lado derecho de la ecuación se aproxima a cero, quedando entonces $I = E$.

Las pérdidas por interceptación en bosques constituyen con frecuencia una parte significativa (25-75%) del total de agua evaporada (Gash y Stewart, 1975; Jarvis y McNaughton, 1986; Shuttleworth, 1993). Expresadas como porcentaje de la lluvia incidente, las pérdidas por interceptación pueden variar desde el 9% en el Amazonas (Lloyd et al., 1988) hasta valores tan altos como el 60% en bosques de *Picea sitchensis*

y *Picea abies* en Gran Bretaña (Forgeard et al., 1980). Este amplio intervalo de variación se debe principalmente a diferencias en la distribución temporal de lluvia entre ambas regiones. Las mayores pérdidas ocurren en climas con frecuentes eventos de lluvia de pequeña magnitud, en contraposición a aquellos climas con pocos eventos de gran intensidad (Rutter et al., 1975).

El estudio de las pérdidas por interceptación tiene gran importancia en el balance hídrico de las cuencas, en especial cuando las precipitaciones son escasas e irregulares y cuando gran parte del porcentaje interceptado es evaporado como ocurre en nuestros ecosistemas forestales, donde el agua evaporada puede representar entre el 70 y el 90 % del agua de lluvia (Sadeghi et al., 2015). Esto es posible porque en esta zona mediterránea, la demanda evaporativa de la atmósfera es superior al agua de lluvia, pudiendo llegar a duplicar e incluso triplicar los valores de ésta.

La interceptación está sometida a la influencia tanto de factores bióticos (propiedades de la vegetación), como abióticos (climatología)(García-Estríngana, 2011). Los principales modelos de estudio de la interceptación (Rutter et al., 1971; Gash, 1979; Gash et al., 1995) incorporan medidas de la cobertura o de la proporción de huecos del suelo sin cubierta. El diámetro del tronco, la altura de la planta, el área basal, el área de proyección ortogonal, la densidad de la cubierta y el índice de área foliar (*IAF*) son medidas ampliamente utilizadas que permiten caracterizar los efectos hidrológicos de la vegetación (Parker et al., 2004; Zabret, 2013), siendo los dos últimos los parámetros bióticos que con más frecuencia se relacionan con la capacidad de almacenamiento y la evaporación.

Es menos frecuente encontrar relaciones en la bibliografía entre los parámetros de biomasa y los flujos de interceptación, aunque algunos autores si la han observado (Tromble, 1983; Crockford y Richardson, 2000). En relación a la densidad de la cubierta, existe un efecto contrapuesto. Por un lado cubiertas densas son capaces de almacenar grandes volúmenes de precipitación, lo que favorecería las pérdidas por interceptación, pero por otro lado impiden el acceso del aire y la formación de turbulencias, reduciendo la evaporación (Domingo et al., 1998).

En relación a los factores climáticos, el volumen de precipitación, la intensidad, la duración y la continuidad de los eventos, son los parámetros que más atención han

recibido. El agua almacenada en una cubierta vegetal se incrementa a medida que lo hacen el volumen y la intensidad de la precipitación hasta su saturación, que representa la capacidad de almacenamiento del dosel (S) (Aston, 1979; Hashino et al., 2002; Keim et al., 2006; Attarod et al., 2015)

Johnson (1942) sugirió que cada tipo de tormenta tenía que ser estudiada de forma individual y no agrupada. Se ha hecho un gran esfuerzo por automatizar la medida del volumen e intensidad de la precipitación, para conocer al detalle la intensidad instantánea de cada evento y su intermitencia, pero no ha sido hasta estos últimos años cuando se ha empezado a automatizar la medida de los flujos de interceptación y observar cómo varían con las características de la precipitación. En la revisión de Llorens y Domingo (2007) tan sólo el 6% de los estudios midieron de forma automática estos flujos. Las pérdidas por interceptación también dependen de la temperatura, la humedad relativa del aire, la velocidad y dirección del viento (Cape et al., 1991), mientras que la radiación incidente parece jugar un papel poco relevante en la evaporación durante la precipitación (Teklehaimanot y Jarvis, 1991; Domingo et al., 1998; Carlyle-Moses, 2004).

2.2. Antecedentes

Desde los primeros trabajos de Horton (1919), son muchos los autores que se han interesado por el tema de la interceptación de la precipitación por la vegetación. Aunque hay muchos estudios entre los años treinta y cincuenta del siglo pasado (Wood, 1937; Kittredge, 1948; Rowe y Colman, 1951), la mayor producción de los mismos comenzó en la década de los años setenta (Aussenac, 1968,1970; Rapp y Romane, 1968). Zinke (1967), siguiendo a Horton (1919), introduce el concepto de capacidad de almacenamiento del dosel (S), definiéndolo como el total de precipitación capaz de retener una cubierta vegetal sin que llegue a caer al suelo. Dicho concepto fue redefinido por varios autores posteriormente (Leyton et al., 1967; Rutter et al., 1971; Gash, 1979) siendo objeto de estudio de muchas investigaciones.

Los estudios sobre interceptación han alcanzado un gran desarrollo en los últimos años, ya que de este proceso se derivan consecuencias que afectan a varias fases del ciclo hidrológico y a otros muchos aspectos hidrológicos, edafológicos, geomorfológicos y biológicos. Además, se ha demostrado las implicaciones sobre otros aspectos de gran interés relacionados con la transformación de la energía cinética de la

lluvia por la cubierta vegetal (Schottman, 1978; McGregor y Mutchler, 1978; Quinn y Laflen, 1981), con la distribución de tamaños de las gotas de trascolación (Maeme y Chong, 1979; Vis, 1986; Brandt, 1989; Wang et al., 2015) o la influencia del impacto de las gotas de lluvia sobre la vegetación, en la generación de trascolación y de escorrentía cortical (Ford y Deans, 1978; Herwitz, 1987; Nanko et al., 2011).

Las respuestas hidrológicas varían en gran medida según la cobertura existente, debido a las complejas interacciones entre el clima, el suelo y la vegetación (Zhang et al., 2001; Sun et al., 2015). En zonas de clima mediterráneo como la nuestra, el estudio del proceso interceptación tiene gran importancia, dado que el porcentaje interceptado y evaporado en este tipo de clima es elevado (Mateos Rodríguez y Leco, 2010). La interceptación representa un factor muy importante dentro del ciclo hidrológico en estas regiones, dada la gran variabilidad anual e interanual de las precipitaciones y la ocurrencia de largos períodos de sequía. El conocimiento de este proceso en un territorio adhesionado como el que nos ocupa, donde los resultados del comportamiento de cada uno de los individuos del estrato arbóreo puede servir para simular los procesos de todo el sistema, es fundamental en este tipo de ambientes semiáridos (Calabuig et al., 1979).

Son escasas las investigaciones que se han realizado sobre el proceso de interceptación de agua de lluvia en *Pinus pinea* L. (García Apaza, 2005; Mazza et al., 2011) y en *Cistus ladanifer* (Simões et al., 2009; García Estríngana, 2011), a pesar de que son especies que se distribuyen ampliamente en ambientes mediterráneos. En la Tabla 1.1, se revisó la interceptación y la capacidad de almacenamiento en diferentes especies de pinos y arbustos de ambiente mediterráneo encontrados en la literatura. A modo de comparación, se han añadido al final de la tabla los resultados de nuestro trabajo, que se presentarán en detalle en el Capítulo 4. Es obvio que nuestro mayor periodo de estudio de toma de datos permite obtener conclusiones sobre el proceso de interceptación en años secos y en años lluviosos no encontrados en la literatura.

2. Marco teórico

Autor	Localización	Período de medición	Especie	Resultados
1. Huber y Oyarzún (1984)	Valdivia, Chile	Junio 1981 – Mayo 1982	<i>Pinus radiata</i>	1. 10.3% 2. 0.9 mm
2. Domingo et al. (1994)	Almería, Sur de España	Año hidrológico 1988-1989	<i>Pinus nigra</i> <i>Cistus laurifolius</i> <i>Adenocarpus decorticans</i>	1. 8.5% 2. N/A 1. 28.1% 2. N/A 1. 20.6% 2. N/A
3. Belmonte y Romero (1998)	Mula, SE España	Noviembre 1992-1995	<i>Juniperus oxycedrus</i> <i>Thymus vulgaris</i> <i>Rosmarinus officinalis</i>	1. 36.5% 2. N/A 1. 33% 2. N/A 1. 25.2% 2. N/A
4. García Apaza (2005)	Guardamar del Segura, SE España	Noviembre 2001 - Diciembre 2003	<i>Pinus pinea</i> <i>Pinus halepensis</i>	1. 34.9% 2. 3.69 mm 1. 30.9% 2. 2.74 mm
5. Simões et al. (2009)	Évora, Sur de Portugal	2005 - 2006	<i>Cistus salvifolius</i> <i>Cistus ladanifer</i>	1. 61% T _f 2. N/A 1. 79% T _f 2. N/A
6. Mazza et al. (2011)	Castel Fusano, SO Roma, Italia	Tras el aclareo, en Abril 2003 y en Febrero 2008	<i>Pinus pinea</i>	1. 23.3% 2. N/A
7. García Estríngana (2011)	Guadalajara, España	Marzo 2005 – Abril 2007	<i>Retama sphaerocarpa</i> <i>Caragana arborescens</i> <i>Dorycnium pentaphyllum</i> <i>Medicago strasseri</i> <i>Cistus ladanifer</i>	1. 10.6% 2. 2-4 mm 1. 25.4% 2. 2-3 mm 1. 36.5% 2. 0.5-1 mm 1. 45.2% 2. 1-2 mm 1. 5.6% S _f 2. 0.63 mm
8. Bulcock y Jewitt (2012)	Pietermaritzburg, Sudáfrica	Abril 2008 - Marzo 2011	<i>Pinus patula</i> <i>Eucalyptus grandis</i> <i>Acacia mearnsii</i>	1. 21.4% 2. 0.51 mm 1. 14.9% 2. 0.24 mm 1. 27.7% 2. 0.63 mm
9. Návar (2013)	Norte de México	1997-1998	<i>Pinus pseudostrobus</i>	1. 17.8% 2. 1.03 mm
10. Zhang et al. (2015)	Desierto de Tengger, NW China	2011-2013	<i>Caragana korshinski</i> <i>Artemisia ordosica</i>	1. 16.7% 2. 1.52 mm 1. 22.3% 2. 0.75 mm
11. Presente trabajo	Córdoba, España	Octubre 2010 – Febrero 2016	<i>Pinus pinea</i> <i>Cistus ladanifer</i>	1. 29.6% (23.6% año húmedo; 40.6% año seco) 2. 1.8 mm (1.8 mm año húmedo, 2.1 mm año seco) 1. 17.7% (12.7% año húmedo; 23.6% año seco) 2. 0.7 mm (0.8 mm año húmedo; 1.1 año seco)

Tabla 2.1. Porcentaje de Interceptación (1) y capacidad de almacenamiento del dosel (2) en diferentes especies de pinos y arbustos de ambiente Mediterráneo. Algunos estudios no tienen datos de la capacidad de almacenamiento del dosel y en tal caso se indica con las siglas N/A.

2.3. Estudios de la interceptación en España

En España, los primeros estudios se realizan a finales de los años 70 del siglo pasado. Alvera (1976, 1977), Calabuig et al. (1979), y Calvo de Anta et al. (1979), pueden ser considerados los pioneros de los estudios de interceptación en nuestro país.

En los años 80, los trabajos que se llevaron a cabo se desarrollaron, casi de forma exclusiva, en el marco de los estudios biogeoquímicos y de balance de nutrientes (Escudero et al., 1985; Escarré et al., 1986; González de Tánago et al., 1988; Bellot, 1989; López Sánchez, 1989), cuantificando el volumen y la composición química y mineralógica de los flujos. Muy pocos trataron el aspecto hidrológico de la interceptación y menos aún sus efectos sobre los procesos erosivos.

En los años 90, los estudios fueron más numerosos y se centraron principalmente en los flujos de interceptación, aunque se continuaron estudiando los flujos geoquímicos y se desarrollaron investigaciones de modelización. En las universidades de Alicante y de Barcelona, se inició el estudio biogeoquímico del encinar del Monte Poblet en la Sierra de Prades (Tarragona) (Bellot A., 1991; González Hidalgo, 1992) y en la Sierra de los Filabres en Almería se crea otra estación experimental con el mismo objetivo (Domingo et al., 1994, 1998; Moro et al., 1996; Bellot et al., 1999). Posteriormente, se inician estudios de interceptación en otras áreas como el campo experimental de Rambla Honda (Almería) (Puigdefábregas et al., 1992), la Cuenca de los Acebos en la Sierra de Guadarrama (Segovia) (González Cascón et al., 1994; Minaya Gallego et al., 1997), el Campo experimental de El Ardal (Murcia) (Belmonte Serrato y Romero Díaz, 1993), la Estación de Cal Parisa en el Área experimental de Vallcebre (Barcelona) (Llorens et al., 1997), la estación de la Sierra de Gata en Salamanca (Santa Regina, 1995) y algunas otras cuencas forestales en las que se han hecho muestreos de corta duración (Tarazona et al., 1996; Gómez, 1998; Aboal et al., 1999). La localización dentro del territorio nacional es muy diversa, aunque puede apreciarse una cierta concentración en el área mediterránea, donde se encuentran las estaciones experimentales con estudios más completos y prolongados en el tiempo (Figura 2.1.).

En el siglo XXI han continuado los estudios de interceptación bajo distintos puntos de vista, obteniéndose nuevos datos de distintas especies arbóreas, como la encina (Mateos y Schnabel, 2001; Rodrigo y Àvila, 2001), el roble (Moreno et al., 2001;

2. Marco teórico

Morán Tejeda et al., 2008; Muzylo et al., 2012) o el pino (Ibarra y Echeverría, 2004; Molina y del Campo, 2012; Llorens et al., 2013), y de diferentes especies arbustivas (García Ortiz, 2006; García Estríngana 2011; Serrano-Muela et al., 2011). También hay diversos trabajos que realizan estudios a nivel de escala de cuenca, entre los que se puede citar el de Díaz Gutiérrez et al. (2005) o el de Polo et al. (2011).



Figura 2.1. Localización de algunas áreas en las que se han realizado estudios de interceptación.

2.4. Métodos de medida de la interceptación

Como las pérdidas por interceptación no pueden ser medidas directamente, la cantidad de precipitación interceptada por el dosel ha sido estimada tradicionalmente como la diferencia entre la precipitación incidente y la lluvia que pasa a través del dosel de la vegetación, la cual es dividida en trascolación y escorrentía cortical (Dunin et al., 1988; Huang et al., 2005). Las mediciones a escala de eventos durante largos períodos de tiempo proporcionan una mejor idea de la partición de las precipitaciones que las mediciones periódicas (Llorens et al., 1997; Staelens et al., 2008).

Existen diferentes metodologías para la medida de la interceptación, basadas en mediciones en la parte inferior del follaje: la primera es considerar la vegetación como

una comunidad (Dunkerley, 2000; Rodrigo y Àvila, 2001; Fleischbein et al., 2005; Iida et al., 2006) en donde todas las especies que conforman la vegetación se evalúan conjuntamente; el segundo, a nivel de especie, en donde se analizan individuos aislados ya sea in situ (Návar y Bryan, 1994; Xiao et al., 2000b; David et al., 2006; Guevara-Escobar et al., 2007) o ex situ mediante la simulación de lluvia (Abrahams et al., 2003, Garcia-Estringana et al., 2010).

La precipitación incidente se puede medir por encima de la cubierta o en un claro cercano. Debido a la gran variabilidad espacial de la trascolación, normalmente se mide mediante un muestreo intensivo utilizando una serie de pluviómetros de embudo localizados al azar debajo de las copas de los árboles. Las formas en que se cuantifican el flujo de traslocación y drenaje foliar a nivel de comunidad son: por canaletas (Loescher et al., 2002), pluviómetros o dispositivos que sirvan como tales (Gómez et al., 2002) y parches de captación (Pypker et al., 2005). A nivel de especie existen estudios en donde se cuantifica con pluviómetros (Jackson, 2000; David et al., 2006; Staelens et al., 2008), extensómetros (Huang et al., 2005) y mediante dispositivos que abarquen la mayor parte de la cobertura de la copa (Xiao et al., 2000b; Guevara-Escobar et al., 2007).

La escorrentía cortical se suele medir usando conductos sellados alrededor del tronco que vierten a un depósito o un medidor automático. La escorrentía cortical es muy variable de una planta a otra. Sin embargo, no se mide con tanta precisión en los árboles porque normalmente representa una parte muy pequeña del balance de agua en la cubierta (Díaz Gutiérrez, 2007).

Algunos investigadores (p.ej. Calder y Rosier, 1976) prefieren usar grandes láminas colectoras de plástico para medir la precipitación neta. Este tipo de medidores recogen el total de trascolación y escorrentía cortical en un área de aproximadamente 20 m². Este método soluciona el problema de la variabilidad espacial a pequeña escala, pero no considera variaciones de la precipitación neta en superficies algo mayores.

Existen un buen número de trabajos dedicados, exclusivamente, al desarrollo y puesta en práctica de técnicas y métodos para el estudio de estos procesos, que van desde el diseño de pluviómetros para la medida de la lluvia neta (Hogg et al., 1977); diseño de dispositivos de medida de escorrentía cortical (Smart y Roberts, 1977;

Wright, 1977); técnicas para la medida directa de la capacidad de almacenaje y la evaporación del agua interceptada (Crouse et al., 1966; Hancock y Crowther, 1979; Teklehaimanot y Jarvis, 1991); técnica de medida de la resistencia aerodinámica (Robins, 1974); a sofisticadas técnicas que utilizan radiación gamma atenuada para determinar la biomasa de la cubierta y su capacidad de almacenaje (Olszyczka y Crowther, 1981; Calder, 1986). Se han probado algunas técnicas para medir de forma directa el agua almacenada en la cubierta o la evaporación desde la misma, pero ninguno de estos métodos ha sido aceptado como una técnica de aplicación general (Bouten et al., 1991).

Todas estas medidas indirectas estiman la interceptación como una diferencia pequeña entre dos grandes números y, por ello, tanto la lluvia incidente como la lluvia neta deben ser medidas con precisión (David et al., 2005). Una alternativa para estimar las pérdidas por interceptación es el uso de modelos, que permiten extrapolar los resultados experimentales en el tiempo y en el espacio, permitiendo de esta forma conocer también el funcionamiento del proceso.

2.5. Modelos de interceptación

Los modelos de interceptación tomaron auge en la década de los años setenta, aunque fue Horton (1919) quien realizó el primer intento de modelar las pérdidas por interceptación, tanto para bosques naturales como para matorrales y arbustos. Horton observó que al inicio de los eventos de lluvia, el porcentaje de precipitación que alcanza el suelo es pequeño, aumentando conforme avanza la duración de la tormenta. En su trabajo estudió también la importancia de la forma de la hoja y el ángulo que forman respecto a la horizontal, y como cuando una vez se alcanza la máxima capacidad de almacenamiento en la hoja, el agua es drenada hacia las partes bajas.

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 del lugar donde se obtuvieron, no pueden ser extrapolados a otras áreas con diferentes condiciones de lluvia y vegetación (Massman, 1983; Dingman, 2002).

Rutter et al. (1971) fueron los primeros en presentar un modelo conceptual con una base física, argumentando que el proceso estaba condicionado principalmente por la evaporación desde el dosel húmedo. El estudio de la interceptación realizado por Rutter (Rutter et al., 1971) hizo posible el desarrollo de modelos basados en la física de la interceptación de lluvia. 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 de Whitehead y Kelliher (1991), y, en menor medida, el modelo estocástico de Calder (1986), que conceptualmente es muy diferente de los modelos de Rutter y de Gash, ya que considera que el almacenamiento de la cubierta varía con el tamaño de gota y, por lo tanto, con la intensidad de lluvia. El modelo de Calder emplea la distribución de probabilidad de Poisson para determinar el número de gotas de agua que golpean y son retenidas por el dosel. A continuación, el agua almacenada en el dosel se elimina por evaporación o, si supera la capacidad de almacenamiento del dosel, llega al suelo como drenaje. Este modelo es muy simple y describe muy bien el proceso de interceptación, sin embargo, llegar de una escala de tamaño de gota a la escala de tamaño del bosque es complicado, lo que dificulta la aplicabilidad del modelo. Actualmente sólo los modelos de Rutter y Gash o sus derivados se consideran métodos aplicables de forma general a escala de cuenca (Roberts et al., 2004).

Todos estos modelos se han aplicado en una amplia gama de tipos de bosques para estudiar su aplicación a la hora de estimar la interceptación. Por ejemplo, se han realizado estudios en coníferas (Murakami, 2007), en árboles caducifolios (Gerrits et al., 2010), en bosques subtropicales (Yongqin Zhang et al., 2005) y tropicales (Wallace y McJannet, 2006). En clima mediterráneo se han aplicado en bosque de encino (*Quercus ilex*) (Pereira et al., 2009), y se han adaptado a bosques dispersos de eucaliptos y pinos (Valente et al., 1997), y de robles (Muzylo et al., 2012), así como a especies arbustivas (Domingo et al., 1998; Návar et al., 1999).

Los modelos de interceptación de lluvia se han trabajado generalmente desde dos perspectivas, una basada en la ecuación de balance de masa en el follaje y otra con un enfoque estocástico basado en funciones de densidad de probabilidad. Del primer grupo de modelos, se puede realizar una división en los físicamente basados, que utilizan el balance hídrico como aproximación para el entendimiento del proceso de interceptación de lluvia, y los modelos analíticos, que mediante un conjunto de

2. Marco teórico

expresiones matemáticas describen el proceso de interceptación (Pérez Arellano et al., 2015a).

Con el paso de los años, los datos obtenidos de diferentes observaciones fueron mejorando los modelos de interceptación y se han ido desarrollado otros nuevos (Toba y Ohta, 2005). La implementación de modelos matemáticos está siendo el objetivo de las últimas investigaciones, planteando propuestas metodológicas que mejoren la medición de variables hidrometeorológicas (Méndez Monroy, 2013) que permitan determinar con mayor precisión la intensidad de evaporación del dosel o la capacidad de almacenamiento del mismo (Li et al., 2016; Pereira et al., 2016), y estudiando en detalle la relación de las diferentes características del dosel con el proceso de interceptación (Návar, 2013; Motahari et al., 2013).

Merecen citarse dos revisiones bibliográficas recientes sobre interceptación, una sobre los flujos de interceptación en ambientes mediterráneos en Europa (Llorens y Domingo, 2007) y otra sobre modelización de la interceptación (Muzylo et al., 2009), que reporta en su revisión que existen más de 15 modelos citados y publicados, cada uno con diferentes enfoques, siendo en algunos casos, modificaciones de los modelos originales. Todo ello hace de la interceptación, y de los procesos derivados de ella, objeto de estudio de muchos trabajos que interesan a múltiples ramas de las ciencias medio-ambientales y de la tierra.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción de la zona de estudio

3.1.1. Localización geográfica

La denominada cuenca de “El Cabril” se encuentra situada en su totalidad en el término municipal de Hornachuelos, en la provincia de Córdoba y en el límite con la provincia de Badajoz, en concreto en el extremo suroeste de la Sierra Albarrana a unos 6 km al noreste del embalse de Bembézar (figura 3.1), coordenadas 38°03´ norte y 5°24´ oeste. Asimismo, se encuentra enmarcada en la Comarca del Valle del Guadiato, en un área de escasa población, con relieve medianamente abrupto, en el curso medio del Bembézar, afluente del Guadalquivir.



Figura 3.1. Situación de la cuenca de El Cabril en la provincia de Córdoba

3.1.2. Clima de la zona

La cuenca pertenece al ámbito fitoclimático de tipo IV4 definido por Allué Andrade (1990): "Medios Mediterráneos arbóreos, bosques ilicinos exclusivos y genuínos, menos secos". Las características en cuanto a temperatura y precipitaciones de este fitoclima son:

- Temperatura media de las mínimas del mes más frío: $> -7^{\circ}\text{C}$
- Número de meses de sequía: de 3-11 meses
- Precipitación media anual: < 850 mm

A su vez, según la Clasificación de Rivas Martínez (1987), la cuenca se encuentra dentro de la zona Mediterránea, en concreto en el Piso Bioclimático "Termomediterráneo superior" caracterizándose por una sequía estival más o menos marcada, con posibilidad de heladas desde diciembre a febrero y temperaturas elevadas en verano, estación en la que se produce estrés hídrico. Con respecto al ombroclima de la cuenca, éste es Subhúmedo inferior.

En general, se puede decir que en la zona de estudio existe un clima mediterráneo sub-continental de inviernos fríos, que se caracteriza por presentar veranos e inviernos bien marcados, con temperaturas mínimas diarias uniformes en torno a 4°C , con presencia de heladas en ocasiones, por el efecto atlántico. En verano debido al efecto continental, la media de las temperaturas máximas oscila en torno a los 31°C , lo que supone unos valores elevados. La temperatura media anual de la zona está próxima a los 17°C . Esta diferencia de temperaturas entre estaciones propicia la aparición de microclimas, lo cual se refleja en la variedad de paisajes que presenta la zona. En toda esta área las estaciones intermedias suelen acortarse.

La considerable distancia respecto al Atlántico hace que las precipitaciones escaseen, dándose los máximos en primavera y en otoño. La precipitación media anual oscila entre los 600 y 800 mm, según el Mapa Hidroclimático de Andalucía (REDIAM), aunque según nuestros datos, obtenidos de la estación meteorológica situada en la cuenca de "El Cabril", la precipitación media anual en los últimos 25 años oscila entre los 200 y 650 mm, con un valor promedio de 510mm. Su distribución varía considerablemente con la altitud, produciéndose las mayores precipitaciones en las zonas montañosas del Suroeste con medias entre 700 y 1.000 mm/año, que alcanza los

3. Materiales y métodos

900 a 1.200 mm/año la media de los años húmedos, bajando a 450-600 mm/año la media de los secos. Las precipitaciones más bajas se centran en el borde Norte con valores medios entre los 500 y 550 mm/año, que suben hasta 750-800 mm/año como media en los años húmedos y bajan a 350-450 mm/año como media en los años secos. Las tormentas de verano, producidas por el exceso de calentamiento diurno son relativamente frecuentes en la región.

Según el índice anual de humedad, I_h , que se obtiene dividiendo la precipitación media anual por la evapotranspiración, se puede decir que se trata de una zona de transición entre húmeda ($I_h < 1,00$) y seca ($I_h > 0,50$), ya que en nuestro caso el valor de este índice es de 0,88.

3.1.3. Red fluvial

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Cuenca del Guadalquivir. Su red de drenaje es densa, dada la gran cantidad de ríos y arroyos, de los cuáles algunos son estacionales dependiendo en gran medida de la pluviosidad anual. También posee zonas de acumulación de agua en zonas de umbría y charcas.

El curso principal de agua es el Río Bembézar. Este río nace en la Dehesa Vieja (Badajoz) y se adentra en la provincia de Córdoba por el norte del término municipal de Hornachuelos en la dirección Noroeste-Sureste. Atraviesa moldeando el costado sur de la Sierra Albarrana hasta el pequeño o embalse de “El Cabril” y posteriormente tras sortear un elevado desnivel llega al Embalse de Bembézar donde se remansa por más de 20 kilómetros, hasta que finalmente desemboca en el Río Guadalquivir.

El principal afluente del Bembézar es el arroyo de la Montesina, limitando por el Este la denominada cuenca de “El Cabril”. También se pueden destacar otros arroyos como son el Arroyo del Madroño y el Arroyo de los Caños en la zona Norte, el Arroyo de los Morales en el Noroeste y el Arroyo de los Módulos en el Suroeste. Todos los cursos de agua de la red excavan profundas vaguadas que conforman una trama de subafluentes de fuerte pendiente.

La cuenca viene delimitada por los siguientes límites hidrográficos (figura 3.2):

- El extremo Norte viene dado por la divisoria de aguas que parte de la confluencia de los arroyos del Madroño y de los Morales hasta la línea de cumbre de Sierra Albarrana.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

- Por el Oeste, el límite está formado por la línea que une la cresta de Sierra Albarrana, la Torre Meteorológica y Corta Camilo.
- El límite Este está formado por el arroyo La Montesina desde su confluencia con el arroyo de los Caños hasta la desembocadura del arroyo de los Módulos.
- El límite Sur lo marca el cauce del Río Bembézar.

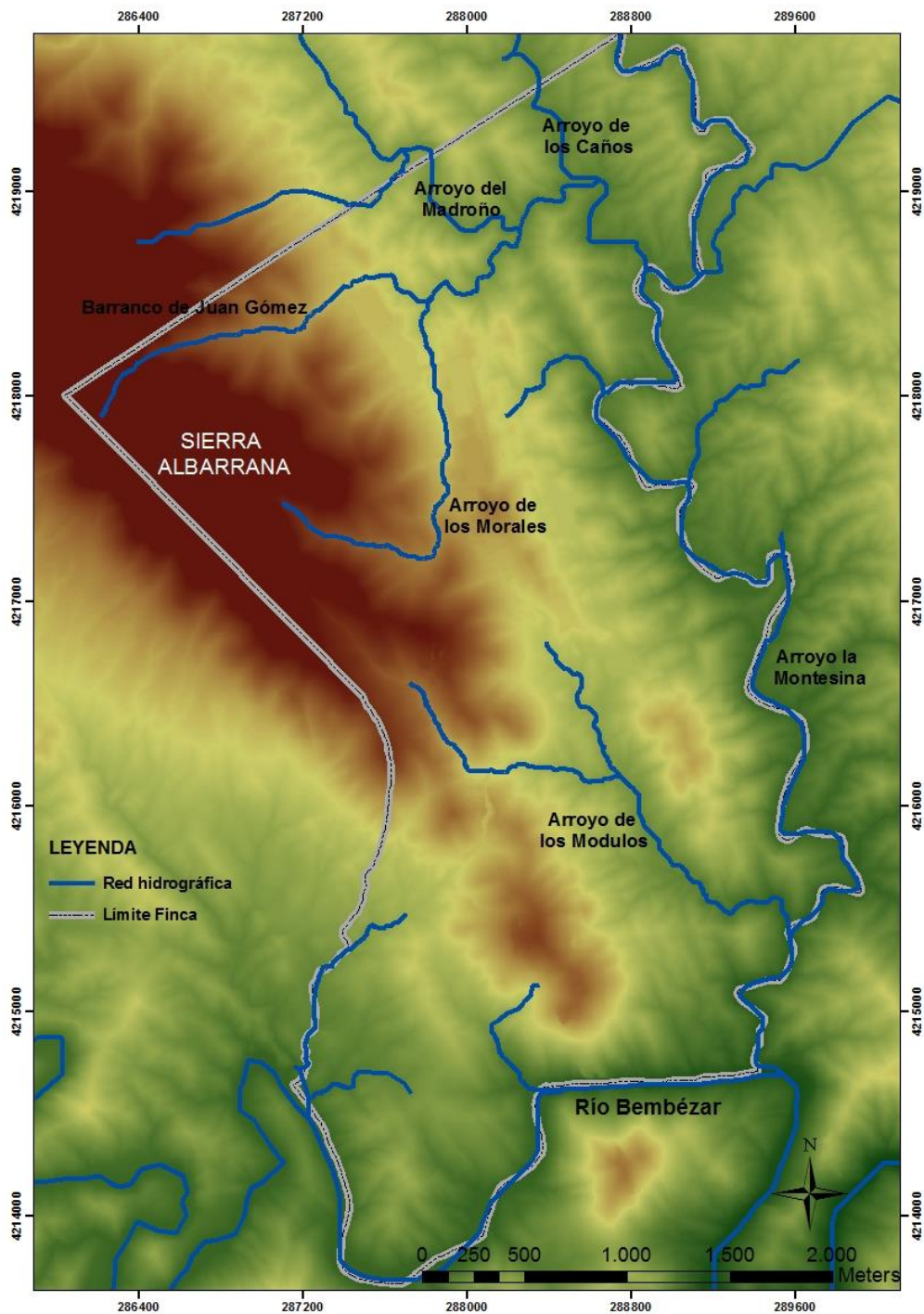


Figura 3.2. Mapa de la red fluvial de "El Cabril" (realización propia).

3. Materiales y métodos

El régimen del río y sus afluentes se caracteriza por las oscilaciones estacionales de caudal, que pueden deberse principalmente a factores climáticos originados por la desigual distribución estacional de las precipitaciones, máximas en otoño-invierno, llegando a torrenciales en muchos casos y casi nulas en los meses estivales. Influyen también las altas temperaturas del verano que incrementan la evaporación hasta unos niveles equivalentes a casi el triple de la precipitación anual.

La intervención humana en la deforestación autóctona, formación de aterrazamientos fácilmente erosionables, cultivo y alteración de los cursos fluviales con presas, pantanos, regadíos, etc., no facilitan la retención natural del agua de lluvia por el terreno.

Observando la figura 3.3., se puede deducir que el área de drenaje de la cuenca de “El Cabril” cuenta con varias subcuencas que aportan agua de escorrentía superficial a cada tramo de la red hidrográfica, entendiendo por tramo la porción de las corrientes de agua entre dos confluencias o entre la cabecera y la primera confluencia. La división del territorio en subcuencas permite un estudio más detallado de las características físicas que dependen de la morfología (forma, relieve, red de drenaje, etc.), la textura y los usos del suelo, la cubierta vegetal, la geología, etc.

3.1.4. Hidrogeología

La cuenca de “El Cabril” se encuentra sobre rocas metamórficas precámbricas fuertemente plegadas y fracturadas. Según las características de las rocas del subsuelo, desde un punto de vista hidrogeológico, el medio fracturado puede asimilarse a un medio de muy baja permeabilidad, anisótropo y muy heterogéneo, con un flujo subterráneo muy variable tanto espacial como temporalmente.

Las direcciones favorables del flujo subterráneo siguen las dos direcciones preferentes, la más dominante según la estructura principal Noroeste-Sureste y con menor orden la de la fracturación principal Suroeste-Noreste. Las superficies de discontinuidad son generalmente verticales con planos lisos y cerrados, índices de rugosidad bajos, pátinas de alteración y meteorización (óxidos), presentando las diaclasas espaciados milimétricos en los gneises-esquistos y centimétricos en las cuarcitas-metaarcosas.

*Modelación de la interceptación en individuos aislados de Pinus pinea y Cistus ladanifer:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación*

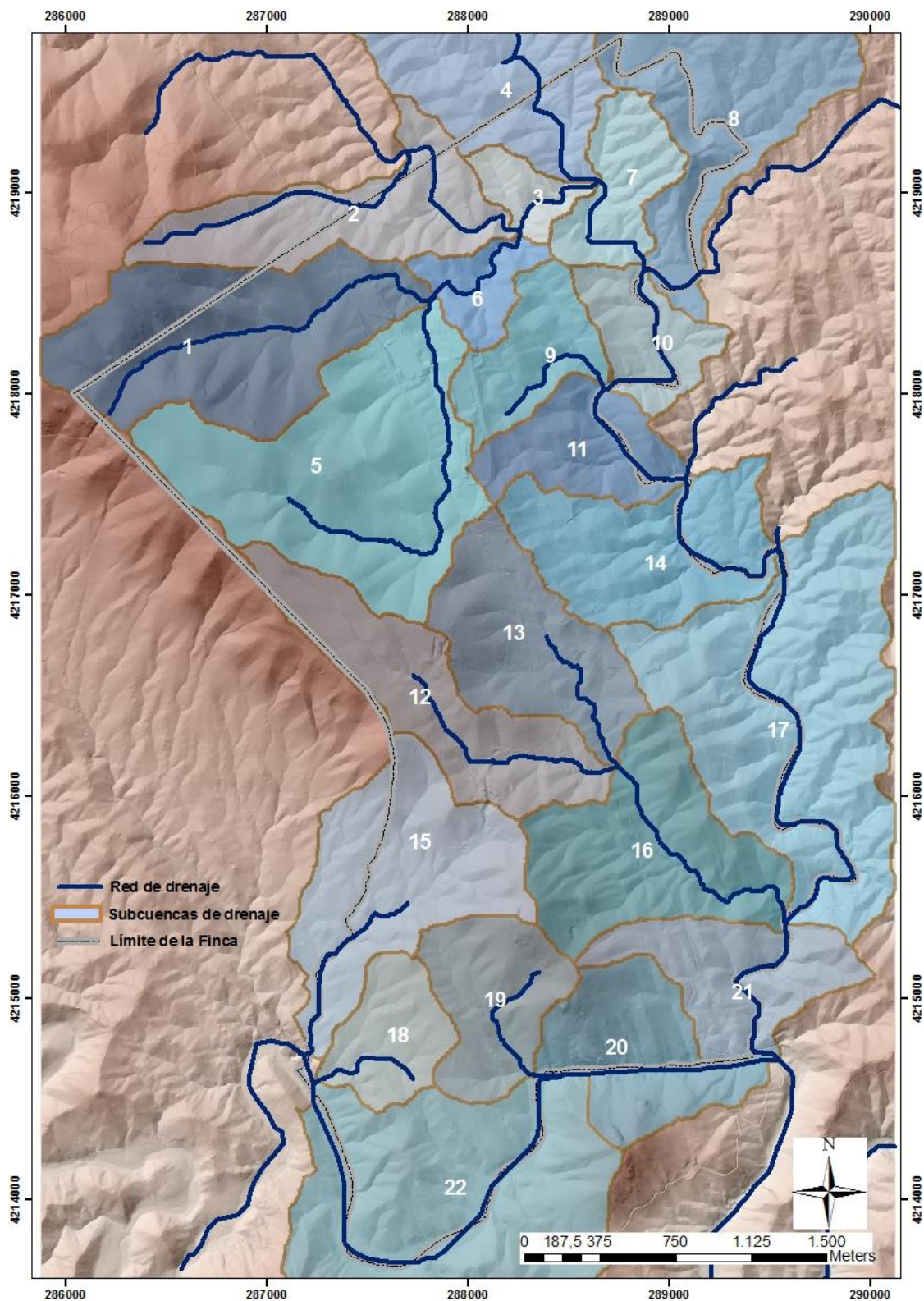


Figura 3.3. Mapa de subcuencas de drenaje de “El Cabril” (realización propia).

Desde un punto de vista general, el medio se comporta como un continuo, es decir, el agua se mueve por todos sus puntos; si bien el medio es muy heterogéneo, y se pueden identificar tendencias en la variación espacial de la permeabilidad.

3. Materiales y métodos

3.1.5. Topografía

La cuenca de “El Cabril” se encuentra situada en la ladera de la Sierra Albarrana, en una zona de relieve medianamente abrupto. Dicha sierra constituye el límite Oeste, y está formada por relieves cuyas cotas topográficas alcanzan los 600 m, con pendientes en su ladera oriental del orden de 30 al 50% hasta llegar al cauce del Arroyo de Los Morales situado a 370 m (figura 3.4).

En la zona central la topografía se hace más suave, con lomas alargadas de dirección Noroeste-Sudeste. Las cotas oscilan entre los 450 m al Sur de la Torre Meteorológica y los 325 m en la zona Norte donde se encuentra el Cerro de los Morales. Las pendientes varían entre el 5 y 15 % en el Este, y entre el 10-20 % en la ladera oriental.

El Cerro de Los Morales queda limitado al Norte y Oeste por el arroyo del mismo nombre, que desemboca en el arroyo de La Montesina (250 m).

Inmediatamente hacia el Este existe una franja de terreno también de dirección Noroeste-Sudeste de relieve suave, con pendientes inferiores al 20%. En el límite Este de esta franja, aparecen una serie de valles consecutivos alineados de Este a Oeste y el relieve se hace más abrupto, con pendientes superiores al 60 %, hasta llegar al Arroyo la Montesina.

3.1.6. Vegetación

Los mapas de vegetación son esenciales para el manejo racional del territorio. El conocimiento de la vegetación presente en la zona de estudio es imprescindible para poder llevar a cabo el estudio de los parámetros de influencia sobre la interceptación en cubiertas forestales.

Vegetación potencial

Se puede interpretar que la vegetación potencial de un territorio se correspondería con la cabecera de serie de la vegetación existente en él. Según esto, cabe determinar la serie de vegetación presentes en la zona de estudio atendiendo a los siguientes criterios:

- Piso Bioclimático: Como se citó en el apartado referente al clima, el Piso Bioclimático es Piso Termomediterráneo superior.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

- Biogeografía: la Biogeografía de la zona donde se ubica la cuenca en cuestión es la recogida en la Tabla 3.1.
- Ombroclima: Subhúmedo inferior (Rivas Martínez, 1987).
- Afinidad edáfica: atendiendo a la litología, predominan los suelos silíceos.

La cuenca de “El Cabril” se encuadra dentro del Subsector Marianense, en concreto dentro del Distrito Tierra de Barros.

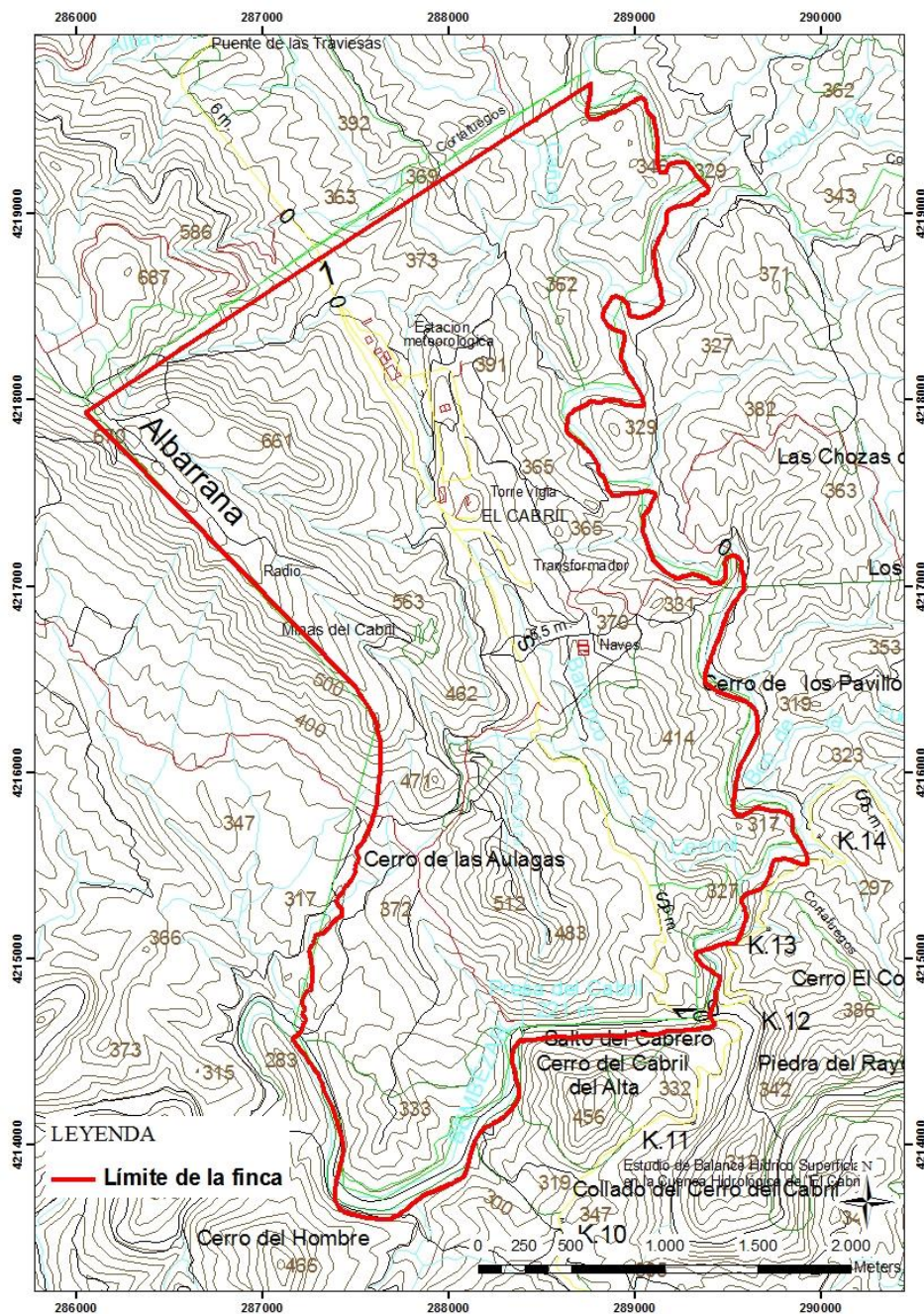


Figura 3.4. Mapa topográfico de “El Cabril”.

3. Materiales y métodos

Tabla 3.1. Biogeografía de la zona donde se ubica la cuenca

REINO	REGIÓN	SUBREGIÓN	SUPERPROVINCIA	PROVINCIA
Holoártico	Mediterránea	Mediterránea Occidental	Mediterráneo-Iberoatlántica	Luso-Extremadurensis

SECTOR	SUBSECTOR	DISTRITO
Mariánico-Monchiquense	Marianense	Tierra de Barros

Según los datos anteriores, se puede determinar que la serie de vegetación de la cuenca de “El Cabril”, de acuerdo a las Series de Vegetación de Rivas-Martínez (1987), es: Hc 24c) Serie mesomediterránea luso-extremadurensis silicícola de la encina con faciación termófila mariánico-monchiquense con *Pistacia lentiscus*.

Es una de las tres series exclusivas de la Península Ibérica. Corresponde en su etapa madura a un bosque esclerófilo en el que con frecuencia existe el piruétano o peral silvestre, así como en ciertas navas y umbrías alcornoques o quejigos. El uso más generalizado de estos territorios, donde predominan los suelos silíceos pobres, es el ganadero; por ello los bosques primitivos han sido tradicionalmente adehesados a base de eliminar un buen número de árboles y prácticamente todos los arbustos del sotobosque (Rivas-Martínez, 1987) (Tabla 3.2).

Vegetación real

La vegetación real tanto de la cuenca de “El Cabril” como de las zonas aledañas se caracteriza por la elevada alteración a la que han sido sometidas como consecuencia de la acción humana. El principal cultivo de la zona, lo constituyen las repoblaciones de pinos (*Pinus pinea*), el adehesamiento de los encinares (*Quercus ilex subsp. ballota*), para generar pastos o cultivar granos y forraje, y la plantación de olivares, viñedos y otros cultivos de secano.

El encinar a menudo forma bosquetes con sotobosque bien desarrollado, que configura un monte alto muy denso constituido básicamente por coscoja (*Quercus coccifera*), lentisco (*Pistacia Lentiscus* L.), labiérnago u olivilla (*Phillyrea angustifolia* L.) y diversas especies de jaras (*Cistus* spp.).

Tabla 3.2. Etapas de Regresión y Bioindicadores. Serie 24c.Hc

ETAPAS DE REGRESIÓN Y BIOINDICADORES. SERIE 24c.Hc SERIE DE LOS ENCINARES MESOMEDITERRÁNEOS	
Nombre de la Serie	24c. Luso-extremadurensis silicícola de la encina
Árbol dominante	<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i>
Nombre fitosociológico	<i>Pyro bourgaeanae-Querceto rotundifoliae sigmetum</i>
I. Bosque	<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i> <i>Pyrus bourgaeana</i> <i>Paeonia broteroi</i> <i>Doronicum plantagineum</i>
II. Matorral denso	<i>Phillyrea angustifolia</i> <i>Quercus coccifera</i> <i>Cytisus multiflorus</i> <i>Retama sphaerocarpa</i>
III. Matorral degradado	<i>Cistus ladanifer</i> <i>Genista hirsuta</i> <i>Lavandula stoechas</i> subsp. <i>sampaiana</i> <i>Halimium viscosum</i>
IV. Pastizales	<i>Agrostis castellana</i> <i>Psilurus incurvus</i> <i>Poa bulbosa</i>

Cuando falta el estrato arbóreo se desarrollan extensos jarales, romerales, aulagas (*Genista hirsuta*), lentiscos y brezos (*Erica arborea*). Asimismo también se puede encontrar bosques de galería en los cursos de los ríos y arroyos, cuya extensión se ha visto reducida e incluso alterada, por la sustitución de especies autóctonas por otras introducidas, como los chopos (*Populus alba* L.) y eucaliptos (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.).

Como resumen, se puede decir que las formaciones vegetales predominantes en la cuenca de “El Cabril” son los pinares y las zonas de matorral o sotobosque compuestas por jarales (figura 3.5).

3.2. Selección de especies

3.2.1. *Pinus pinea*

Entre las especies que forman el estrato arbóreo destaca principalmente *Pinus pinea*, conocido comúnmente como pino piñonero. Esta especie es nativa de la cuenca mediterránea, y cubre aproximadamente 650 000 ha de tierras costeras (figura 3.5).

3. Materiales y métodos

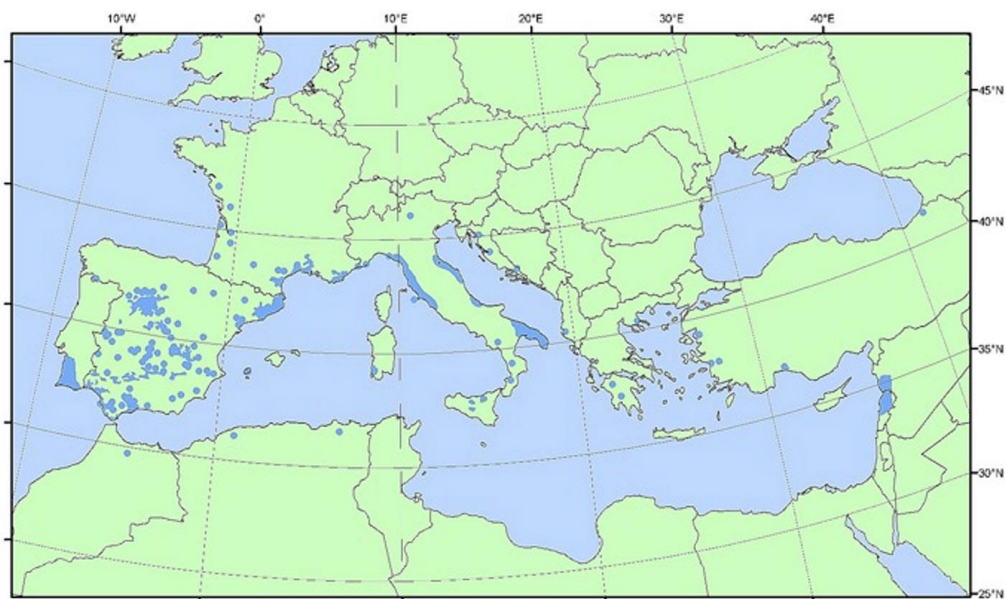


Figura 3.5. Distribución de la especie *Pinus pinea* en la cuenca mediterránea. Fuente: Fady et al. (2004)

Se trata de un árbol robusto de talla media, que puede medir de 20 a 25 m de altura. El porte es característico por su copa densa, ensanchada y aplanada. El tronco es recto y bastante cilíndrico. La corteza considerablemente gruesa es de color pardo-grisáceo, marcadamente agrietada y desprendiéndose en gruesas placas.

El sistema radical es muy potente, con una raíz principal y unas secundarias bien distribuidas y adaptadas para extraer el agua de las capas más profundas. Las ramas laterales tienden a engrosarse tanto como la guía principal, dando lugar a la característica forma aparasolada de la especie. Las hojas, de color verde intenso, son acículas gruesas con un tamaño de 100-200 mm x 1-2 mm (Aránzazu et al., 1997), se mantienen de 3 a 4 años en el árbol y suponen aproximadamente el 5% de la biomasa total del árbol (sin contar los frutos). Las piñas son de gran tamaño (8-14 cm de largo por 7-10 cm de ancho), globosas, de color pardo-rojizo y lustrosas, con escamas ensanchadas hacia el ápice.

Se trata de una especie de terrenos arenosos, profundos y frescos de baja montaña. Prevalce en zonas donde la precipitación supera los 400 mm aunque también lo encontramos en zonas con valores cerca de los 250 mm. Con respecto a los vientos, los resiste bien. En su área de distribución se encuentran temperaturas desde máximas superiores a los 40 °C hasta mínimas inferiores a los -15 °C. La longevidad de sus

individuos oscila entre los 200-250 años, aunque hay ejemplares de hasta 400 años (Aránzazu et al., 1997).

Se seleccionaron dos individuos aislados de *Pinus pinea* en la zona del Arroyo Los Morales (P_M) y ocho individuos en la zona antropizada de la cuenca (P_A), todos ellos en la subcuenca 5 (figura 3.6 y 3.7), donde ésta es la especie vegetal predominante.

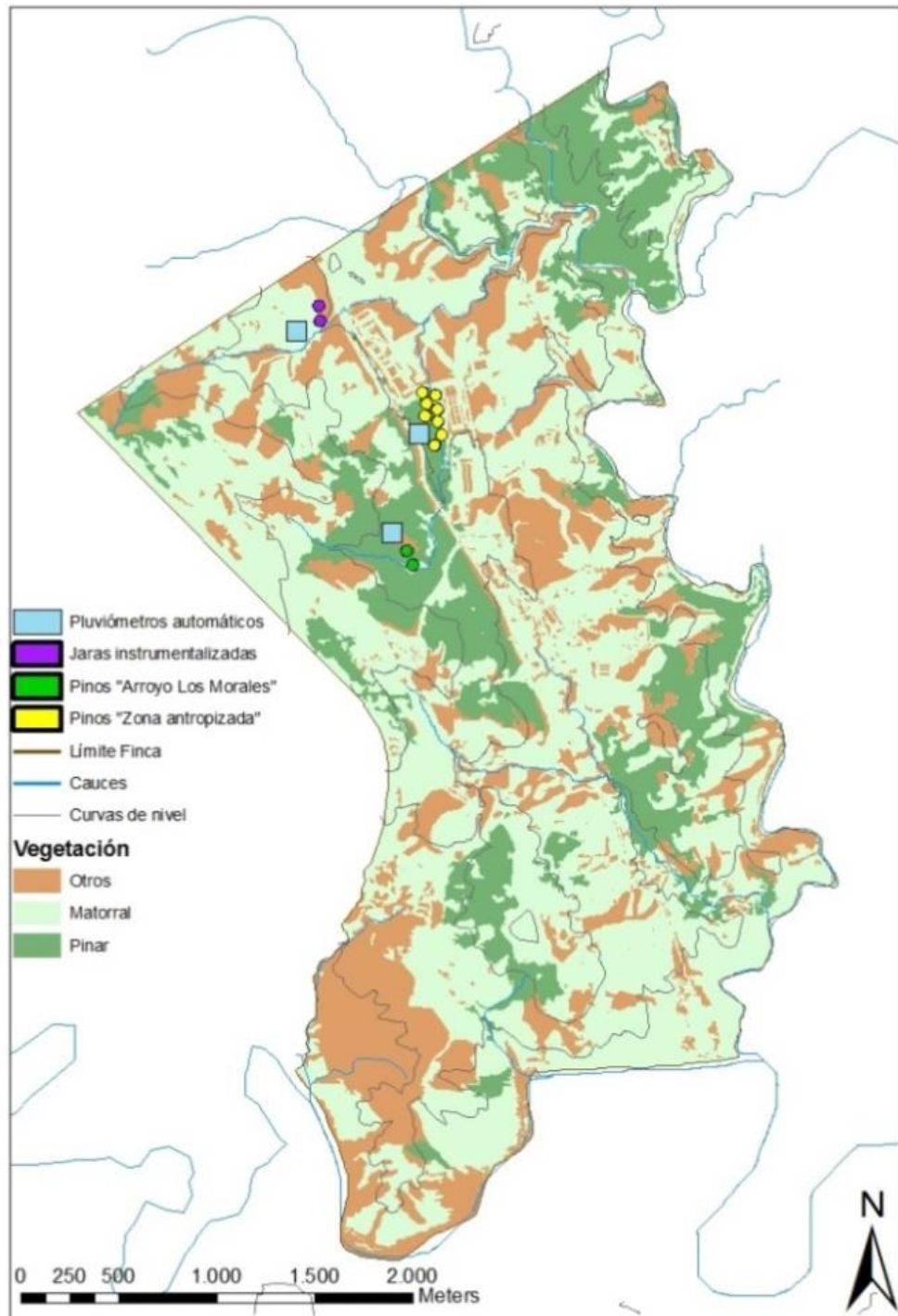


Figura 3.6. Mapa de vegetación de "El Cabril".

3. Materiales y métodos

Los árboles seleccionados para el estudio fueron instrumentalizados para medir los componentes del balance hídrico superficial: trascolación (T_f), escorrentía cortical (S_f) e interceptación (I). Las características de los árboles seleccionados para este trabajo aparecen reflejadas en la tabla 3.3.

El criterio seguido para seleccionar los árboles que serán instrumentalizados dependía de si se les podía aplicar la metodología para medir la trascolación, además de seleccionar árboles que tengan la menor cantidad de ramas y bifurcaciones en la parte baja del tronco y que sean lo más rectos posible, para poder realizar mejor la medida de la escorrentía cortical.

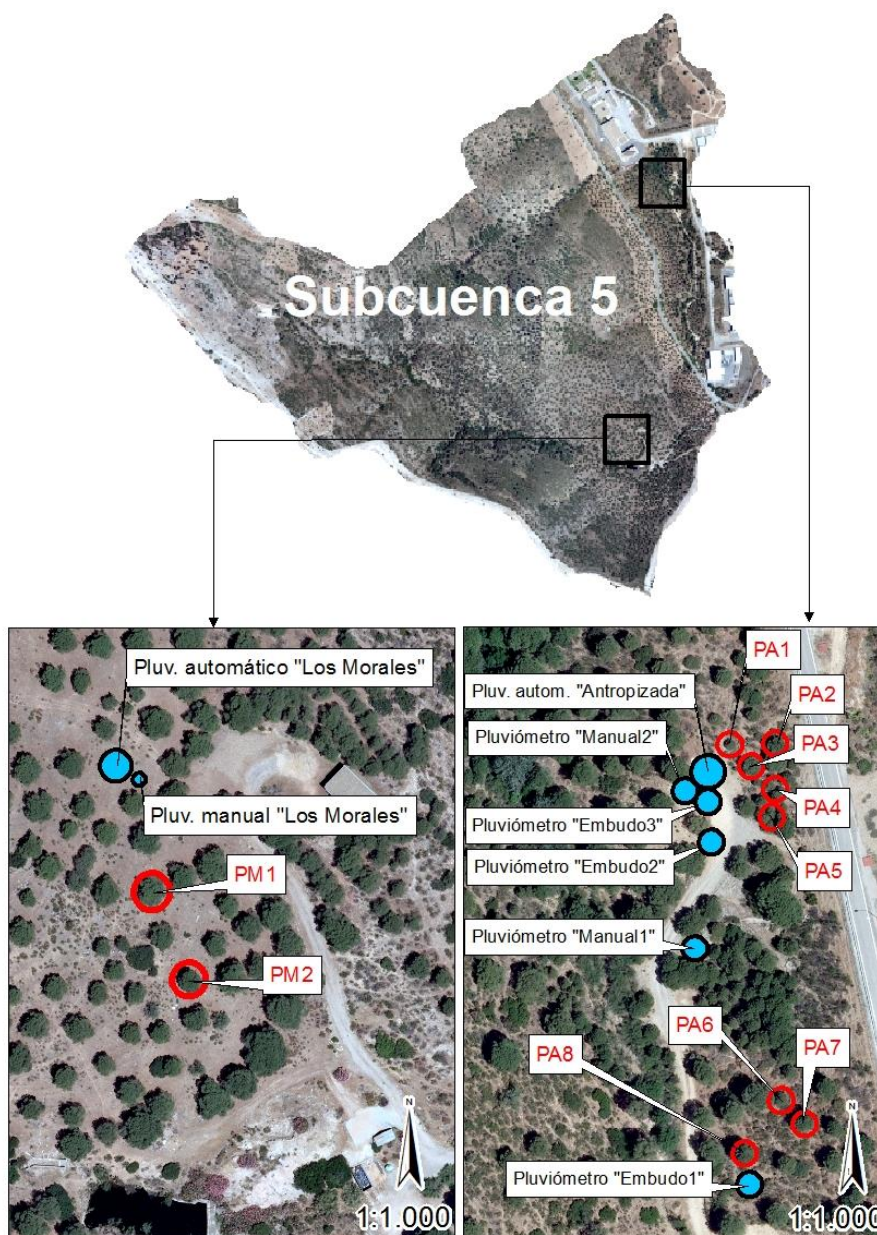


Figura 3.7. Localización de los ejemplares de *Pinus pinea* estudiados.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 3.3. Características de los ejemplares de *Pinus pinea* estudiados

PINUS PINEA	LATITUD	LONGITUD	ALTURA (m)	DBH (Diámetro a la altura del pecho) (m)	ÁREA DE PROYECCIÓN DEL DOSEL (m ²)	ALTITUD (m)	ORIENTACIÓN DE LA LADERA	PENDIENTE (%)
P _M 1	38.076°N	5.421°O	7.8	0.31	33.1	458.1	Sureste	28
P _M 2	38.076°N	5.421°O	8.4	0.34	34.1	461.4	Sureste	27.6
P _A 1	38.050°N	5.252°O	8.7	0.44	70.4	384.3	Oeste	15.8
P _A 2	38.050°N	5.252°O	8.7	0.42	49.7	386.7	Oeste	15.4
P _A 3	38.050°N	5.252°O	5.9	0.27	17.5	385	Oeste	18.1
P _A 4	38.050°N	5.252°O	6.9	0.25	26	386.2	Oeste	16.7
P _A 5	38.050°N	5.252°O	8.2	0.46	40.6	385	Oeste	15.2
P _A 6	38.049°N	5.251°O	9.5	0.37	39.7	384.7	Suroeste	20
P _A 7	38.049°N	5.251°O	9.7	0.40	36.2	388.2	Suroeste	19.4
P _A 8	38.049°N	5.251°O	10.7	0.36	35	379	Suroeste	25.8

Cada uno de los individuos de *Pinus pinea* del Arroyo Los Morales se encuentra rodeado por una valla metálica de 2 metros de altura instalada para proteger la instrumentación del interior. Esta valla está anclada a un murete de hormigón de 20 centímetros de altura construido sobre la superficie del suelo. Esta estructura se puede ver en la figura 3.8. En la zona antropizada de la cuenca se llevó a cabo la instrumentación de 8 ejemplares más de *Pinus pinea*.



Figura 3.8. *Pinus pinea* (P_M2) seleccionado en la zona del Arroyo Los Morales

3.2.2. *Cistus ladanifer*

En cuanto a las zonas de matorral la especie predominante es *Cistus ladanifer*, cuyo nombre común es jara pringosa. Pertenece a la familia Cistaceae. Es un arbusto perenne, que puede medir desde 1 m hasta 3,5 m de altura, aunque normalmente no supera los 2 m. Las ramas son erguidas y rígidas, de color pardo-rojizo. Las hojas se encuentran soldadas entre sí por la base, y son alargadas, estrechas, coriáceas y viscosas, debido al ládano que produce.

Sus flores son grandes, de 5-8 cm, pudiendo alcanzar los 10 cm de diámetro, son solitarias y terminales y con pedúnculos cortos de 5-16 mm. Están formadas por 5 pétalos de color blanco con una mancha en su base.

Su hábitat natural es la región mediterránea occidental (sur de Francia, la mitad occidental de la Península Ibérica y países del norte de África, como Marruecos y Argelia), sobre todo en suelos ácidos (granitos, cuarcitas, pizarras, etc.), pedregosos, secos y muy soleados, con buen drenaje (Castroviejo et al., 1993). Se trata de una especie tanto de climas secos como húmedos, abarcando un amplio rango de distribución altitudinal. Sin embargo, no aguanta los encharcamientos acusados del terreno, tiene una resistencia moderada al frío y es sensible a las heladas.

Para el estudio del balance hídrico en *Cistus ladanifer*, se han instrumentalizado dos ejemplares en la subcuenca 1 (figura 3.6 y 3.9), zona en la que esta especie arbustiva es predominante.

Los ejemplares seleccionados para este trabajo son representativos de la población de jaras en su conjunto, y sus características aparecen reflejadas en la tabla 3.4. Los individuos de *Cistus ladanifer* seleccionados están rodeados por una valla de 1,5 m de altura, fijada al suelo mediante unas picas (figura 3.10), y que al igual que en el caso de los pinos del Arroyo Los Morales, protegen la instrumentación del interior.

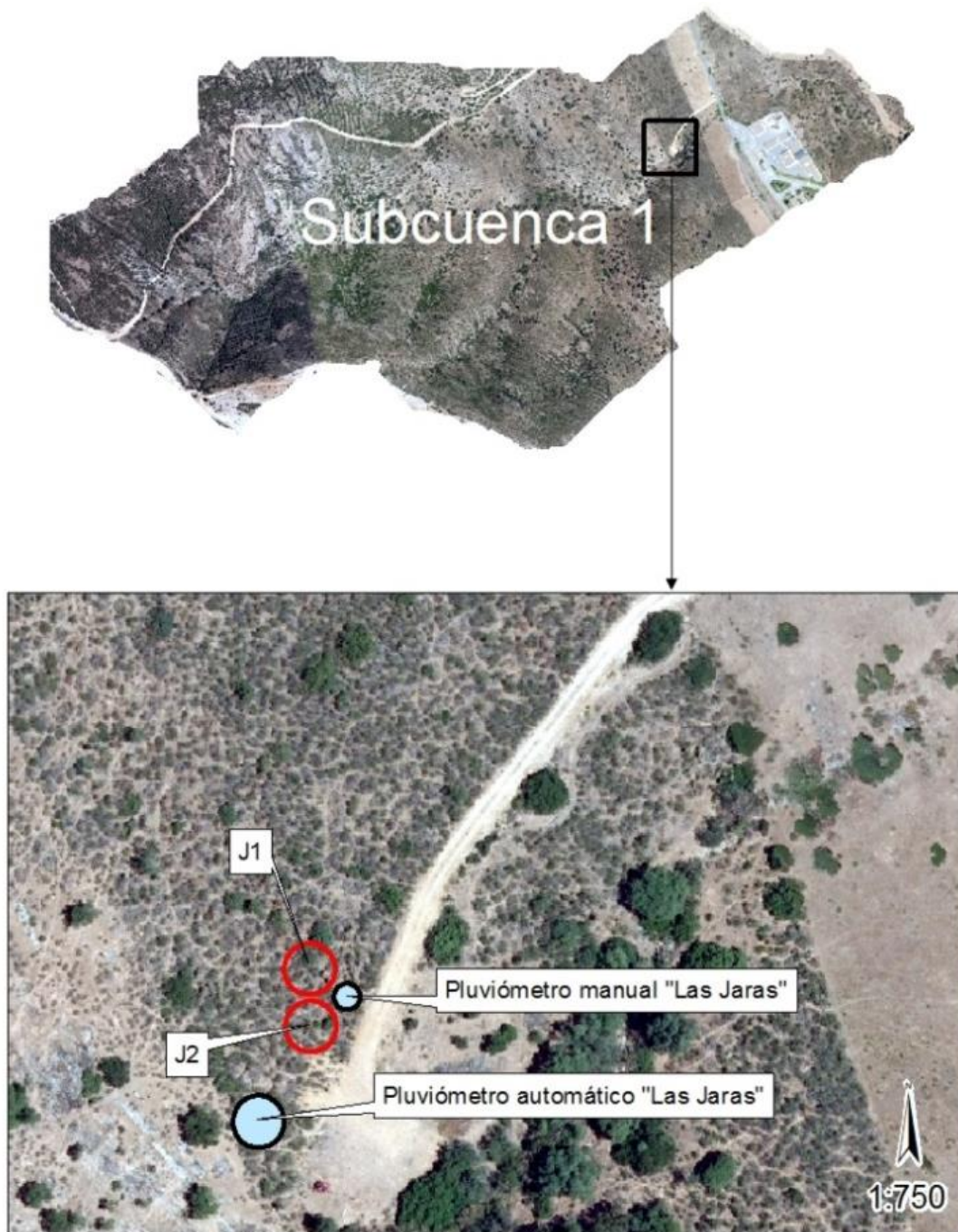


Figura 3.9. Localización de la zona experimental de *Cistus ladanifer*.

Tabla 3.4. Características de los ejemplares de *Cistus ladanifer* estudiados.

<i>CISTUS LADANIFER</i>	LATITUD	LONGITUD	ALTURA (m)	DBH (Diámetro a la altura del pecho) (m)	ÁREA DE PROYECCIÓN DEL DOSEL (m ²)	ALTITUD (m)	ORIENTACIÓN	PENDIENTE (%)
J1	38.087 ⁰ N	5.427 ⁰ O	1.9	0.05	0.78	410.3	Sur	19
J2	38.087 ⁰ N	5.427 ⁰ O	1.8	0.06	0.79	407.4	Sur	19



Figura 3.10. Ejemplar de *Cistus ladanifer* (J2) seleccionado en la Subcuenca 1

3.3. Medición de los componentes de la interceptación

3.3.1. Precipitación

Gracias a la estación meteorológica existente en la cuenca de “El Cabril”, se disponen de datos horarios de precipitación desde Enero del año 1990. Para obtener una mayor precisión de los datos de lluvia, en Octubre del año 2010, se instalaron en cada una de las zonas experimentales, un pluviómetro automático de cazoleta basculante marca Eijkelkamp (Eijkelkamp Agrisearch Equipment BV, Nijverheidsstraat 30, 6987 EM Giesbeek, The Netherlands) de 0,2 mm de precisión, que registra los datos de precipitación cada 10 minutos en un datalogger.

Los pluviómetros automáticos se encuentran situados a unos 20 metros de los ejemplares estudiados, en un claro sin vegetación, tal como se puede observar en la figura 3.11, con una distancia necesaria a los árboles para que éstos no interfieran en las medidas y poder captar así la precipitación a cielo abierto (Morán Tejeda et al., 2008).

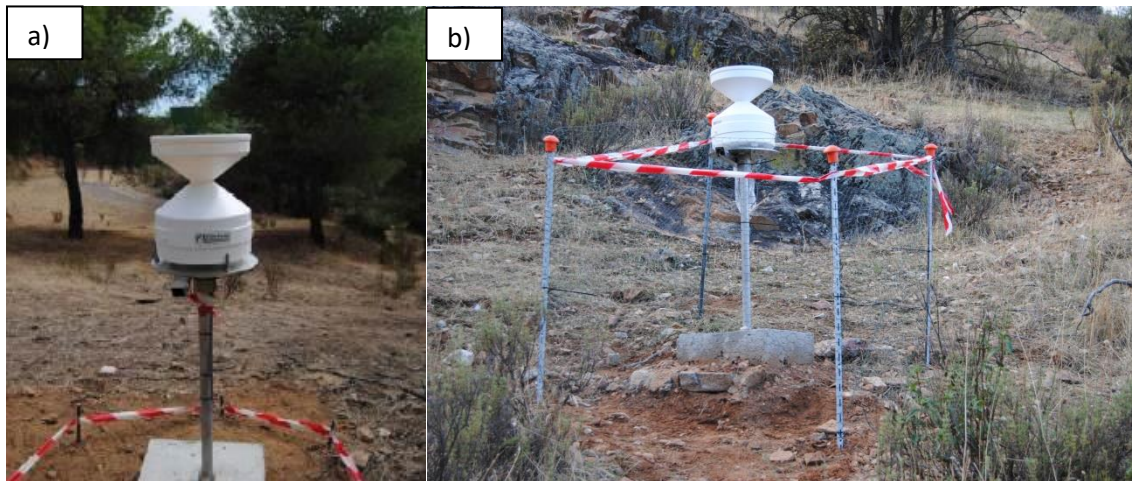


Figura 3.11. Pluviómetro Eijkelkamp instalado junto a los ejemplares de *Pinus pinea* (a) y *Cistus ladanifer* (b)

Junto a los pinos estudiados en la zona antropizada se instaló en Abril del año 2014, otro pluviómetro automático en este caso de la marca Decagon, en concreto el modelo ECRN-100, que es un pluviómetro electrónico de balancín autodescargable de 0,2 mm de precisión, fabricado con un plástico impermeable resistente a la intemperie y a la radiación UV (figura 3.12). La precipitación captada es conducida a un equipo digital de registro continuo dotado de un datalogger para almacenar la información.



Figura 3.12. Pluviómetro Decagon instalado en la zona antropizada.

3. Materiales y métodos

Para comprobar el correcto funcionamiento de los pluviómetros automáticos, se instaló junto a cada uno de ellos y a una altura de 2 metros un pluviómetro manual de 9,3 cm de diámetro, los cuales están graduados para su medida directa en milímetros de lluvia (figura 3.13).



Figura 3.13. Pluviómetros manuales.

Adicionalmente, se realizaron medidas de precipitación mediante tres embudos de 21 cm de diámetro ubicados en diferentes claros de la zona antropizada a una altura de 2 metros (figura 3.14), sujetos a unos soportes que eran inmovilizados con tres cuerdas para evitar el efecto del viento. Estas medidas fueron realizadas para contrastar el correcto funcionamiento de estos pluviómetros de embudo que, como se verá a continuación, también fueron utilizados para la medida de la trascolación en la zona antropizada.



Figura 3.14. Pluviómetros de embudo.

3.3.2. Trascalación

En Octubre de 2010 se comenzó a realizar la medida de la trascolación en la zona del Arroyo de los Morales. Durante el periodo de estudio se han puesto en práctica diferentes diseños experimentales. En un principio, se optó por impermeabilizar el suelo bajo uno de los ejemplares (P_{M1}) mediante una cubierta de plástico para impedir que el agua de lluvia se infiltrara (figura 3.15a), llevando el agua de trascolación a través de una tubería a tres depósitos de 200 litros de capacidad conectados entre sí (Xiao, McPherson, et al., 2000b). Además la instalación estaba cerrada lateralmente con una capa impermeable de 2 metros de altura (figura 3.15b), desde el suelo hasta el comienzo de la copa, creando un área ligeramente inferior al de la copa del árbol ($28,14 \text{ m}^2$) para asegurar así que toda el agua recogida era trascolación, impidiendo que la lluvia lateral penetrara en el interior de la parcela. La trascolación en el otro individuo de *Pinus pinea* (P_{M2}) se midió mediante la instalación en el suelo, bajo el dosel del árbol, de una serie de pluviómetros manuales situados aleatoriamente, pero tratando de conservar una homogeneidad en el espacio y abarcando las diferentes singularidades de la cubierta (Santiago Hernández, 2007).

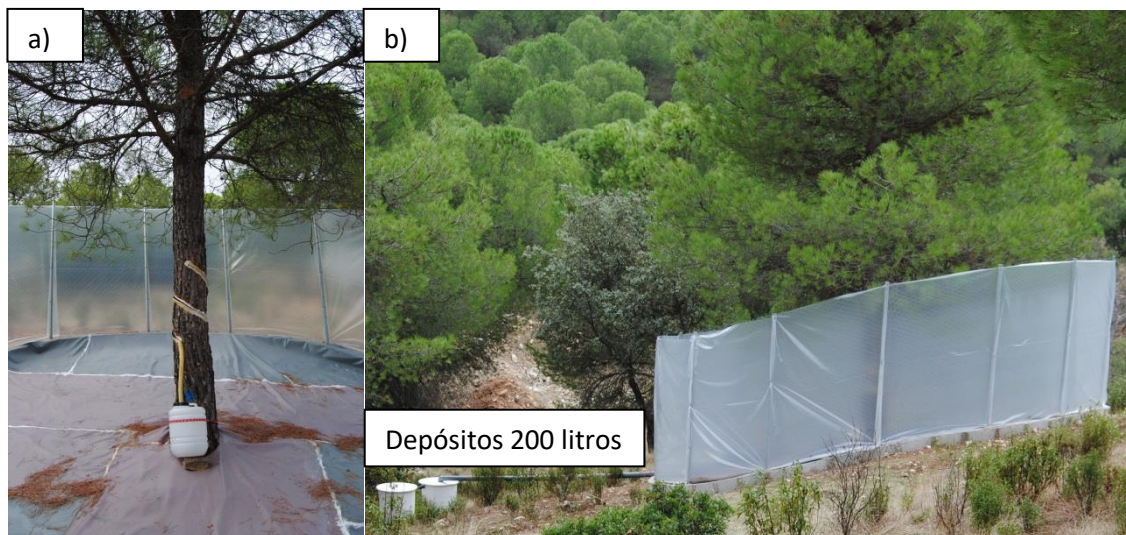


Figura 3.15. Instrumentación inicial empleada para la medida de la trascolación en *Pinus pinea* (P_{M1}).

En Octubre de 2013, se modificó el diseño experimental, de forma que, para medir la trascolación, se dispusieron bajo cada ejemplar de *Pinus pinea* 8 pluviómetros manuales de 9.3 cm de diámetro situados en el suelo siguiendo las direcciones cardinales y formando dos anillos concéntricos a una distancia del tronco de $1/3$ y $2/3$

3. Materiales y métodos

del radio máximo del dosel, colocándose 4 pluviómetros en cada anillo, con el objetivo de obtener información de la mayor parte del dosel (Nanko et al., 2011). Se instalaron además 6 canaletas metálicas de 2 metros de largo y 20 centímetros de ancho, situadas de forma radial justo por debajo del dosel, sujetadas mediante dos soportes que nos permiten regular la canaleta en altura e inclinarla para propiciar la caída del agua por la misma hasta un orificio de salida, al que se ha conectado un tubo que llevará el agua recogida hasta un depósito de 25 litros de capacidad (Hot, 1998; Iroume y Huber, 2000). Al final de la canaleta se colocó una pestaña con la función de que el agua recogida por ella caiga por el orificio, evitando que parte del agua se acumulara en los centímetros finales (figura 3.16a). El pequeño hueco que se forma entre esta pestaña y el final de la canaleta fue agujereado de forma que el agua cayera libremente y no se quedara acumulada (figura 3.16). Además, sobre las salidas de las canaletas se colocó una pequeña red para evitar que se obstruyeran por las acículas del árbol que caen sobre las mismas. Estas canaletas nos aportan una segunda medida de la trascolación, en teoría más precisa que la anterior ya que éstas forman transeptos continuos y la superficie de recogida es mayor, lo que permite controlar la variabilidad de la trascolación del dosel (Cantú y Humberto González, 2002). Finalmente, se instalaron bajo cada árbol dos pluviómetros automáticos de la marca Decagon, descritos anteriormente, situados igualmente en altura justo por debajo del dosel y a una distancia del tronco igual a la mitad del radio máximo del dosel, en una zona donde no afecten a la medida de los pluviómetros manuales instalados en el suelo. Estos pluviómetros automáticos 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 (figura 3.17).

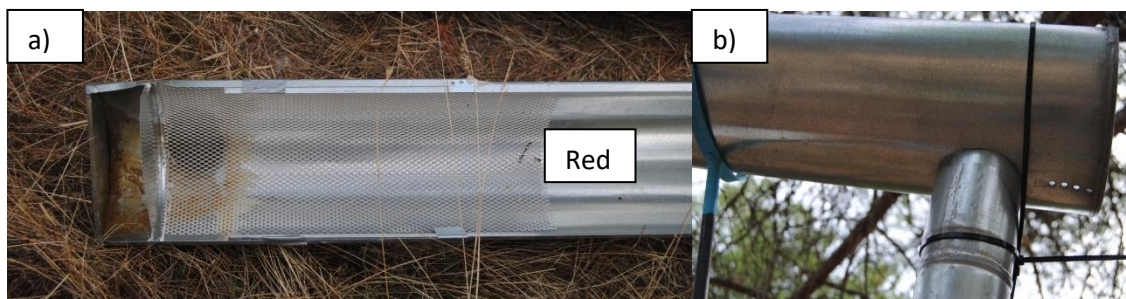


Figura 3.16. Detalle de una de las canaletas empleadas para la medida de la trascolación.



Figura 3.17. Instrumentación empleada actualmente para la medida de la trascolación en los ejemplares de *Pinus pinea* ubicados en la zona del Arroyo los Morales.

La metodología empleada para la medida de la trascolación en los ocho árboles de *Pinus pinea* seleccionados en la zona antropizada consiste en 4 colectores de PVC en forma de embudo de 21 cm de diámetro situados en altura justo por debajo del dosel de cada uno de los individuos, gracias a unos soportes que permiten regular la altura a la que se coloca el embudo (figura 3.18). Dichos embudos se colocaron en las cuatro direcciones cardinales, a una distancia del tronco igual a la mitad del radio del dosel (Carleton y Kavanagh, 1990). Para evitar la entrada de las acículas que pudieran obstruir el paso del agua, los embudos fueron protegidos con una red, tal como se aprecia en la figura 3.19. El agua de trascolación recogida por cada colector es conducida por un tubo conectado a la base del mismo hasta un depósito de 12 litros de capacidad, donde es almacenada. La toma de datos en estos ejemplares se inicia en Abril de 2014.



Figura 3.18. Instrumentación para la medida de la trascolación en *Pinus pinea* ubicados en la zona antropizada.



Figura 3.19. Detalle del embudo utilizado para la medida de la trascolación en *Pinus pinea*

La medida de la trascolación en el primer ejemplar de *Cistus ladanifer* (J1) se inicia en Octubre del año 2010. La metodología elegida en este caso fue una adaptación de la denominada "interception flow collection box" descrita por Belmonte y Romero (1998). Este dispositivo consiste en una superficie cuadrada impermeable, que cubre toda la base del arbusto, rodeada por un perímetro en forma de "L" que asegura que el escurrimiento no se desborde. El agua recogida es conducida al punto de drenaje situado en una de las esquinas donde hay una manguera que la canaliza finalmente a un depósito de 25 litros (figura 3.20a). La superficie de la caja es prácticamente idéntica al área de proyección de la copa con el fin de evitar la entrada de precipitación incidente y asegurar así que toda el agua recogida es trascolación. De forma similar a la metodología seguida en la primera instalación realizada en *Pinus pinea*, se ha impermeabilizado lateralmente la parcela para impedir la entrada de la lluvia lateral (figura 3.20b). La medida de la trascolación en el segundo ejemplar de *Cistus ladanifer* (J2) comienza a realizarse en Febrero del año 2015.

Este dispositivo tiene el inconveniente de que puede privar a la planta de la humedad, ya que el suelo bajo la planta es impermeable y puede desviarse toda la precipitación neta del sistema radicular, por lo que a largo plazo puede ocurrir que la planta se vaya marchitando. En nuestro caso, esto no ocurre, dada la gran pendiente del terreno donde están ubicados nuestros ejemplares, que permite que el agua de escorrentía superficial pase por debajo de la caja y la planta no se seque.

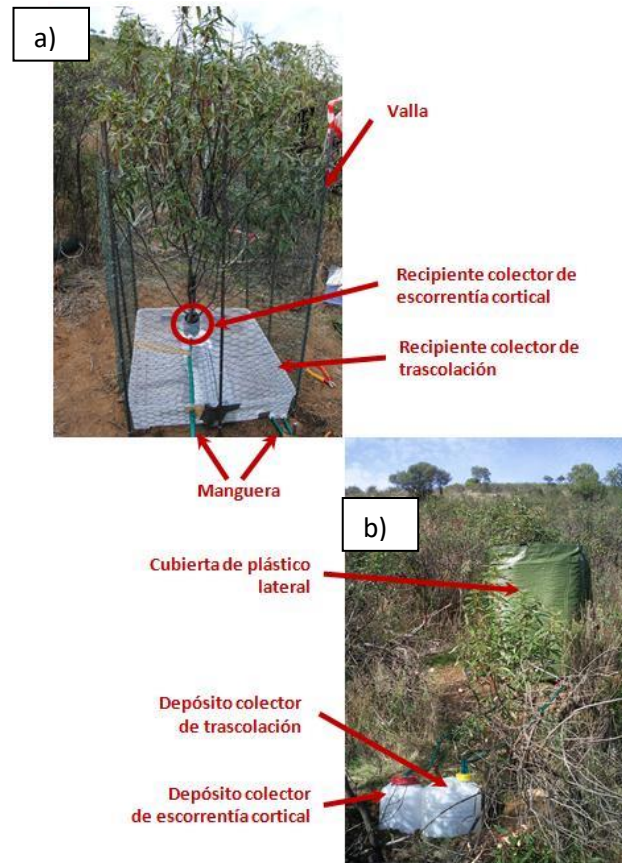


Figura 3.20. Instrumentación de un ejemplar de *Cistus ladanifer* (J1).

3.3.3. Escorrentía cortical

La metodología seguida para la medida de la escorrentía cortical en *Pinus pinea* ha sido la misma en todos los individuos en la que se ha realizado, y consiste en una manguera cortada longitudinalmente y sellada alrededor del tronco del árbol, al que previamente se le ha realizado una inserción en forma de espiral. Esta manguera recoge toda el agua que escurre por el tronco y la conduce bien hasta un pluviómetro automático, tal como se muestra en la figura 3.21a., en los árboles del Arroyo Los Morales, o bien hasta un depósito de 12 litros de capacidad, como en el caso de los individuos estudiados en la zona antropizada (figura 3.21b.).

3. Materiales y métodos

La escorrentía cortical en los árboles estudiados en la zona antropizada se comenzó a medir en Marzo de 2015 y se realiza en cuatro de los ocho individuos seleccionados, mientras que de los árboles de la zona del Arroyo de los Morales, se tienen medidas desde Octubre de 2010, aunque la medida continua mediante pluviómetros automáticos se inició en Octubre de 2013.



Figura 3.21. Instrumentación para la medida de la escorrentía cortical en *Pinus pinea*.

Para medir la escorrentía cortical en *Cistus ladanifer* se ha colocado un recipiente sellado alrededor del tronco de la planta (figura 3.22), que recoge el agua que fluye por el mismo, siendo conducida igualmente con una manguera hacia un depósito colector de 12 litros (Moreno-Pérez et al., 2012).



Figura 3.22. Instrumentación para la medida de la escorrentía cortical en *Cistus ladanifer* (J2).

3.4. Equipos de medición

3.4.1. Caracterización morfológica

Con el fin de modelar el comportamiento de los componentes del balance hídrico en los individuos elegidos, se necesita conocer las variables dasométricas mostradas en la figura 3.23.

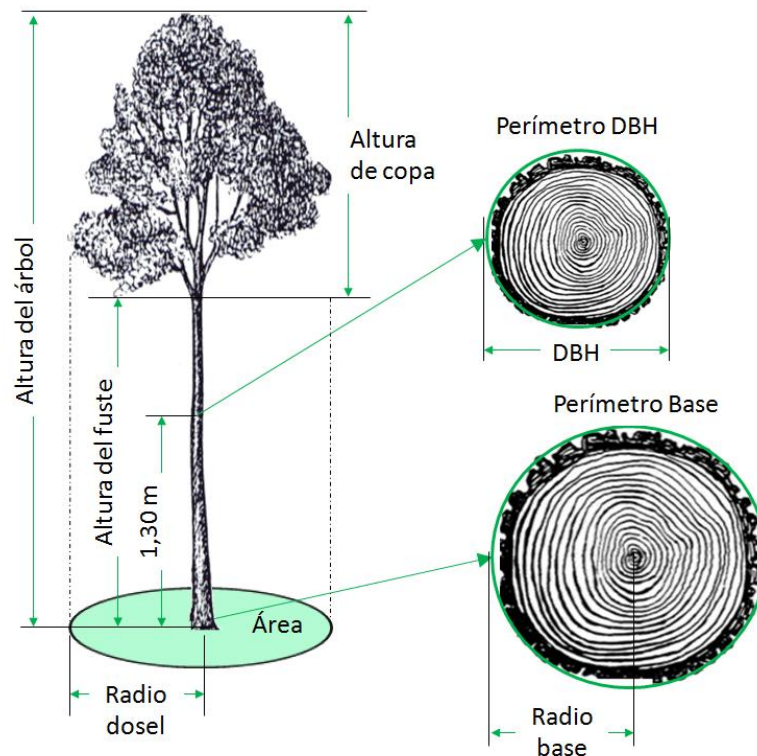


Figura 3.23. Medidas dasométricas realizadas en los individuos elegidos

Estas características son las siguientes:

Altura del árbol ($h_{\text{árbol}}$)

También llamada altura total. Es la distancia vertical entre el plano del suelo y el que pasa por el ápice (figura 3.23).

Existen dificultades para la medición de esta característica dada la gran altura de los individuos de *Pinus pinea*. Para determinar la altura de los árboles, se han empleado dos metodologías, la primera consiste en el empleo de una barra telescópica que era situada en la base del árbol y se iba alargando hasta que llegaba al ápice de la copa. Un observador situado a una distancia suficiente avisaba cuando la barra llegaba a este punto. Posteriormente la barra se sitúa en el suelo y se realiza la medición. Un segundo

3. Materiales y métodos

método empleado ha sido mediante la toma de fotografías. El software Image-Pro Plus 4.5 (Media Cybernetics, 2001) permite calcular la altura del árbol a partir de la medida de una barra que situada junto a la base del tronco, es tomada como referencia (figura 3.24). Con esta metodología también ha sido posible medir otras características como la altura del fuste y de la copa del árbol, o el diámetro del dosel.



Figura 3.24. Medida de las características del árbol mediante fotografía

Altura del fuste (h_{fuste})

Es la altura vertical entre el plano del suelo y el plano que pasa por la inserción de la primera rama viva (figura 3.23). Siendo, por tanto, el fuste la parte del tronco desprovisto de ramas.

Altura de la copa (h_{copa})

Es la altura vertical entre el plano que pasa por la primera rama viva y el que pasa por el ápice (figura 3.23).

Diámetro a la altura del pecho (DBH)

Es el diámetro del fuste medido a 1,3 m desde el suelo (figura 3.23). En otros países como en Francia se mide a 1,5 m. Para su medida se puede utilizar una forcípula o una cinta. El primero es un instrumento que consta de una regla graduada y uno o dos brazos entre los que se introduce el fuste para la medida. En este caso se coloca la forcípula a la altura del pecho y el operador en la base del árbol. El segundo es una cinta métrica graduada que se usa para medir la sección perimetral que, a su vez, nos proporciona el valor de su diámetro. Igualmente se colocaría a 1,3 m.

Diámetro en la base (D_{base})

Es el diámetro del fuste medido en su base. Igualmente se puede medir con una forcípula o una cinta.

Radio del dosel

Es la distancia entre el eje del árbol y la proyección del dosel en las cuatro direcciones cardinales (figura 3.23).

Área de proyección de la copa (A_{copa}).

Medida de la superficie ocupada por la proyección vertical de la copa de la planta en el suelo. Las copas de los árboles tienen formas muy variables, pudiendo asimilarse a distintas geometrías, como es el caso de los árboles de especies como *Quercus pirenaica* Willd. o *Pinus pinea*, cuya copa presenta una forma ovoide o elipsoide (Diéguez Aranda et al. 2003, Martínez-Zurimendi et al., 2009), algo que se constata en campo y en las fotos de los ejemplares de estudio.

Así pues, para *Pinus pinea* se calcula a partir de los diámetros del dosel y considerando una copa elipsoidal, por tanto, se necesitan los datos de dos diámetros cruzados de la copa, en dirección Norte-Sur y Oeste-Este (figura 3.25).

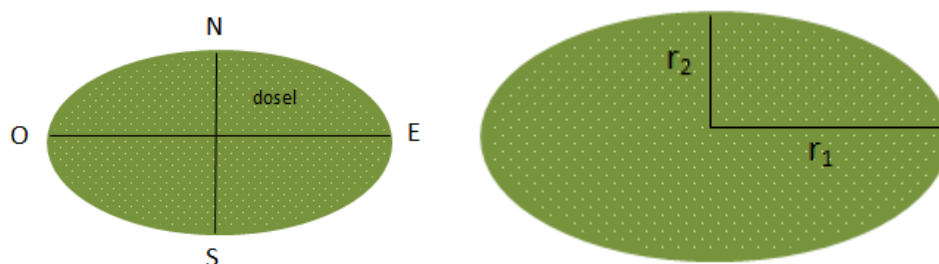


Figura 3.25. Dosel elipsoidal

Una vez que se conocen los diámetros de la elipse se calculan los radios correspondientes y el área de proyección de la copa de acuerdo a las ecuaciones 3.1 y 3.2:

$$r_1 = \frac{D_{O-E}}{2} \quad (3.1)$$

$$r_2 = \frac{D_{N-S}}{2} \quad (3.2)$$

A partir de estos datos, se puede calcular el área de la copa aplicando la ecuación 3.3:

$$A_{copa} = \Pi \cdot r_1 \cdot r_2 \quad (3.3)$$

Volumen de la copa (A_{copa}).

Medida de la extensión ocupada en tres dimensiones por el dosel arbóreo. Para *Pinus pinea* se calcula a partir de los datos de altura de copa de cada uno de los pinos y del área de copa, considerando una copa con forma elipsoide, aplicando la ecuación 3.4:

$$V_{copa} = A_{copa} \cdot h_{copa} \quad (3.4)$$

Finalmente, se han calculado los ratios o índices $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$ y $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$.

3.4.2. Índice de Área Foliar

El índice de área foliar se define como el área total de la superficie superior de las hojas del dosel por área de unidad de terreno que se encuentre directamente debajo de la planta. Este índice se puede calcular midiendo el área de cada hoja de un dosel que cubre un área de suelo determinada. Anderson (1971) desarrolló un método menos destructivo para calcular el *IAF*: el uso de fotografías hemisféricas. Mediante esta técnica se calcula la fracción de luz que penetra el dosel y aplicando un modelo matemático de predicción se obtiene un valor aproximado del índice de área foliar.

Es un hecho generalmente aceptado que para proporcionar datos más confiables de la cobertura del dosel, debe retirarse del proceso de medición tanto error humano como sea posible. Para ello, nada más idóneo que el empleo de fotografías digitales, y más concretamente, la utilización de la fotografía hemisférica, ya que proveen de una vista hacia arriba de todo o parte del cielo. Usualmente este tipo de imágenes se obtienen con una cámara fotográfica equipada con una lente hemisférica o de “ojo de pez” (fisheye lens) que se orienta hacia arriba, es decir, al cenit. La fotografía así

lograda provee al investigador de un registro permanente que puede ser luego analizado para determinar qué partes del cielo son visibles y cuales están siendo obstruidas por el dosel del bosque. Así, se convierte en una fuente valiosa de información sobre la posición, tamaño, densidad y distribución de los claros del dosel. Con ella se pueden capturar las diferencias en la arquitectura del dosel, debidas a las especies, sitio y edad, basándose en la atenuación de la luz y el contraste dentro de la foto.

Muchos autores consideran que el *IAF* es un buen estimador de los flujos de interceptación (Leonard, 1965; Aston, 1979; van Dijk y Bruijnzeel, 2001; Deguchi et al., 2006; Keim et al., 2006; Park y Cameron, 2008). Se han hecho numerosos estudios para evaluar este índice y confirmar que la interceptación se incrementa proporcionalmente con respecto a su magnitud (Pypker et al., 2005; Martin y Stephens, 2006). En concreto, en el modelo reformulado por Gash et al. (1995) se empleó el *IAF* como estimador de la cobertura, porque este índice se consideró relacionado linealmente con la capacidad de almacenamiento y la intensidad de evaporación. Pero el *IAF* puede no ser suficiente cuando la textura de las hojas y ramas es muy rugosa y gruesa (Aston, 1979). En este sentido Deguchi et al. (2006) constataron, en un bosque secundario con dominio de especies de hoja caduca, que el *IAF* no explicaba todo el efecto de la vegetación porque para una reducción del 39 al 47 % del *IAF* las pérdidas por interceptación sólo se reducían entre un 15 y un 23%. Sin embargo, Santiago Hernández (2007) muestra en su estudio una relación directa de la interceptación con respecto al *IAF* para la mayoría de los eventos medidos en ecosistemas con un estrato, uno formado por *Eupatorium sp.*, y otro formado por *Quercus sp.*, mientras que en un ecosistema de tres estratos (*Eupatorium sp.*, *Ptelea trifoliata* y *Quercus sp.*) aparece una relación contraria en la mayoría de los eventos analizados. Las relaciones inversas pueden ser debidas a que los estratos bajos que conforman a los ecosistemas con tres estratos reciben aportaciones de los estratos superiores por la presencia de viento.

Las fotografías hemisféricas tomadas en los ejemplares estudiados se han realizado utilizando una cámara digital Canon D3000 equipada con una lente angular u ojo de pez (Opteka 6.5mm f/3.5 Manual Focus Aspherical Circular Fisheye Lens) (figura 3.26).



Figura 3.26. Cámara digital Canon D300 equipada con ojo de pez.

Se ha elaborado un protocolo para la toma de imágenes hemisféricas con el propósito de estimar el Índice de Área Foliar (*IAF*) de las especies con las que estamos trabajando. Existen diversos factores que pueden conducir al error en la toma de fotos del dosel. El principal de ellos es la posición de la cámara. La uniformidad de la iluminación es también muy importante, y es precisamente lo más difícil de obtener, por lo que de ser posible, sólo se deberán tomar fotografías cuando el cielo esté completamente nublado, o bien al amanecer o al anochecer (figura 3.27).

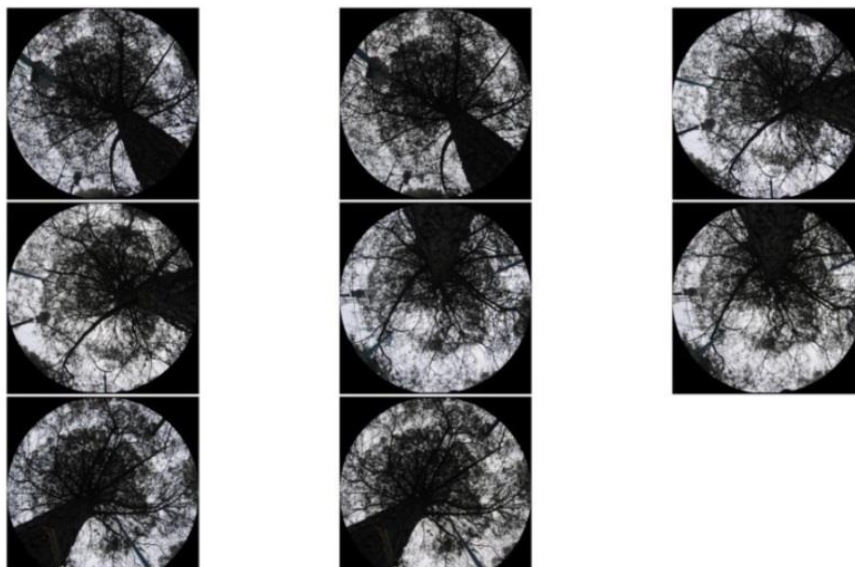


Figura 3.27. Ejemplo de imágenes tomadas con lente hemisférica en *Pinus pinea* (P_M1)

Los pasos para tomar la fotografía pueden resumirse como sigue:

1. Características del día de la toma. Elegir un día bien nublado, de madrugada o a la caída de la tarde. El sol no debe salir en la foto, pues en ese caso se presentan reflejos en el follaje, y el área alrededor del sol, muy brillante, dificultará después establecer el contraste necesario para analizar la cobertura de dosel.

2. Características de la cámara. Se debe elegir la máxima resolución de la imagen, alta sensibilidad y baja compresión de la imagen.

3. Operaciones en campo. Son las siguientes:

a. Ajustar la cámara al trípode. Debe ser posible verificar que la lente esté apuntando hacia el cenit, utilizando un nivel de burbuja del tipo “ojo de pollo”.

b. Posicionar y nivelar la cámara a una altura adecuada sobre el suelo.

c. Ajustar el tiempo de apertura y de exposición.

d. Tomar las fotografías en este orden:

Norte (N) - Este (E) - Sur (S) - Oeste (O)

e. La foto se toma con el temporizador de la cámara asegurándose de mantener el cuerpo fuera del ángulo de visión de la lente. Se debe realizar un registro de los datos necesarios para más adelante interpretar los resultados obtenidos (figura 3.28).

El paso siguiente es procesar las imágenes obtenidas con el fin de transformar la posición de los píxeles en coordenadas angulares y clasificar los píxeles en suelo/cielo y vegetación verde para calcular la fracción de huecos y la distribución del brillo. Existen diferentes programas que permiten importar imágenes hemisféricas, mostrarlas y analizarlas a partir de técnicas de segmentación de la imagen, la mayoría de ellas diseñadas para procesar fotografías desde abajo, como por ejemplo Hemiview (Rich, 1990), y WinSCANOPY (Jarčuška et al., 2010). En este estudio se ha utilizado el software libre CAN-EYE V6.313 (Weiss y Baret, 2014).

3. Materiales y métodos

 Cuaderno de campo FOTOGRAFÍAS HEMISFÉRICAS			
LOCALIZACIÓN DE LA TOMA DE FOTOGRAFÍAS			
Día		Observaciones	
Hora			
Tiempo de exposición			
Altura sobre el suelo			
Coordenadas			
Condición del clima			
Condición del suelo			
Etiquetado de las fotografías			
Foto ID	1	2	3
Orientación			
Etiqueta foto			
Foto ID	4	5	6
Orientación			
Etiqueta foto			

Figura 3.28. Hoja de datos para el etiquetado de las fotografías hemisféricas.

Este programa requiere previamente hacer un experimento de calibración de la lente ojo de pez de la cámara que se va a utilizar, dado que los sistemas ópticos no son perfectos y es necesario al menos disponer de dos características principales para llevar a cabo un procesamiento preciso de las imágenes hemisféricas:

- Las coordenadas del centro óptico
- La función de proyección: En CAN-EYE V6.313 se supone que es una proyección polar (las distancias angulares en grados en la zona del objeto son proporcionales a las distancias radiales en píxeles en el plano de la imagen).

Un método sencillo para obtener el centro óptico consiste en conseguir las coordenadas de un punto cuando se gira a lo largo de un eje. Esto se podría lograr fácilmente mediante la perforación de un pequeño agujero en la tapa del ojo de pez, y la adquisición de imágenes para una serie de posiciones. Es posible utilizar varios agujeros para comprobar la consistencia de la estimación del centro óptico (figura 3.29).

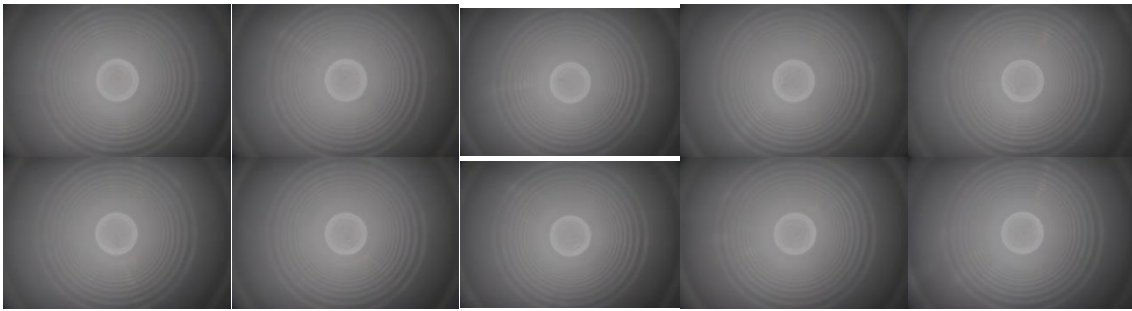


Figura 3.29. Serie de imágenes tomadas en varias posiciones utilizando una tapa perforada. En este caso, se consideraron dos agujeros.

Las posiciones de rotación deben ser tan simétricas como sea posible a fin de minimizar los posibles sesgos en la estimación del centro óptico. Una vez tomadas las fotos, hay que obtener las coordenadas de los diferentes agujeros y de la esquina superior izquierda de cada imagen, a través de un software de procesamiento de imágenes (por ejemplo, Microsoft Photo Editor). Estos datos se introducen en un archivo de Excel proporcionado por el programa. Este archivo contiene 4 hojas denominadas "Inicio", "Centro Óptico", "Función de proyección" y "Resultados". Cada hoja se debe rellenar con los datos correspondientes de la calibración realizada.

A continuación se deben realizar las mediciones para obtener la función de proyección. El diseño experimental se describe en la figura 3.30. Consiste en un marco de 50x50 cm acotado por un cuadrado de 30x30 cm por los laterales. Tres lados de esta configuración están equipados con una regla. Tanto la cámara como el diseño experimental deben ajustarse horizontalmente. La cámara se alinea a lo largo del eje principal del diseño utilizando la línea frontal y la del fondo. Se han de tomar dos fotografías hemisféricas a dos distancias (H y $H'=H+\Delta$) desde el centro del diseño y siempre alineadas a lo largo del eje óptico (figura 3.31).

Nuevamente a través de un software de procesamiento de imágenes con el que se pueda obtener las coordenadas de los píxeles, se toman medidas de los diferentes puntos de cada imagen que se indican en la hoja de Excel que proporciona el programa. Automáticamente en la hoja de resultados aparece el coeficiente que relaciona el radio (en píxeles) en la imagen con la dirección de visión correspondiente (en grados). El campo máximo de visión del sistema de la lente ojo de pez de la cámara se calcula mediante el ajuste de un círculo a la imagen (figura 3.32).

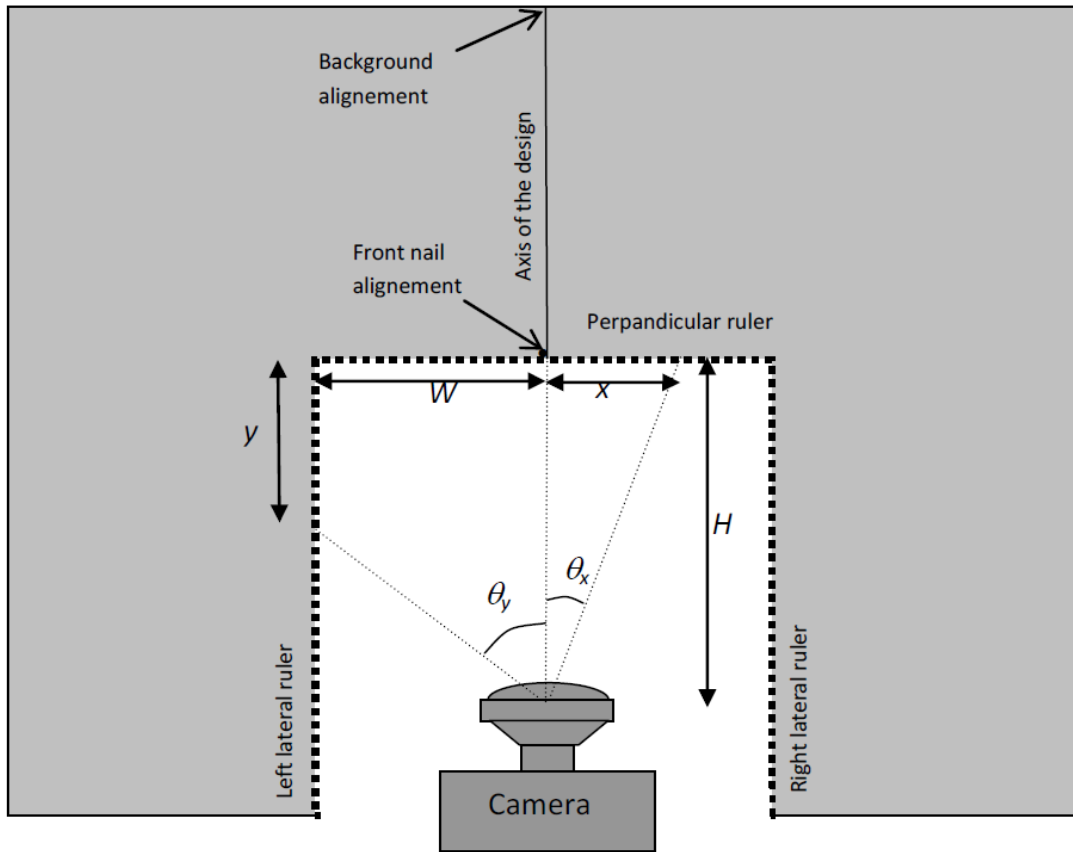


Figura 3.30. Esquema del diseño experimental (Fuente Weiss y Baret, 2014).

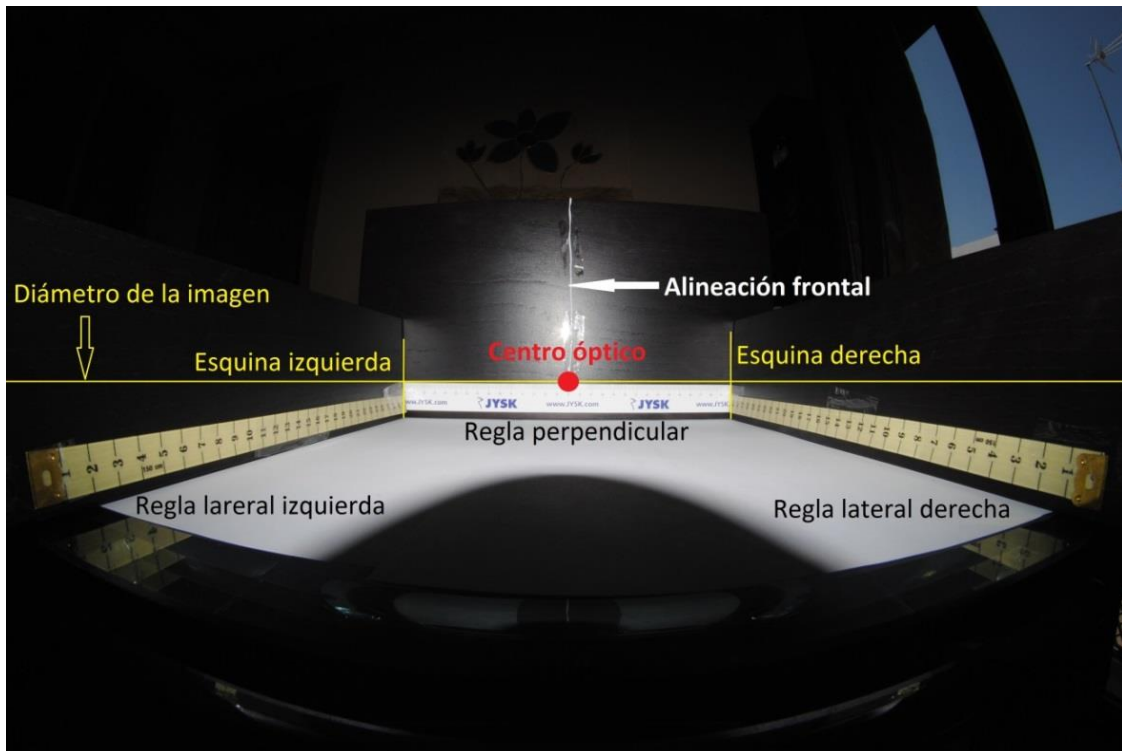


Figura 3.31. Ejemplo de una imagen del diseño experimental tomada con la cámara hemisférica utilizada para la calibración de la función de proyección. La línea amarilla horizontal se corresponde con el diámetro de la imagen que pasa por el centro óptico.

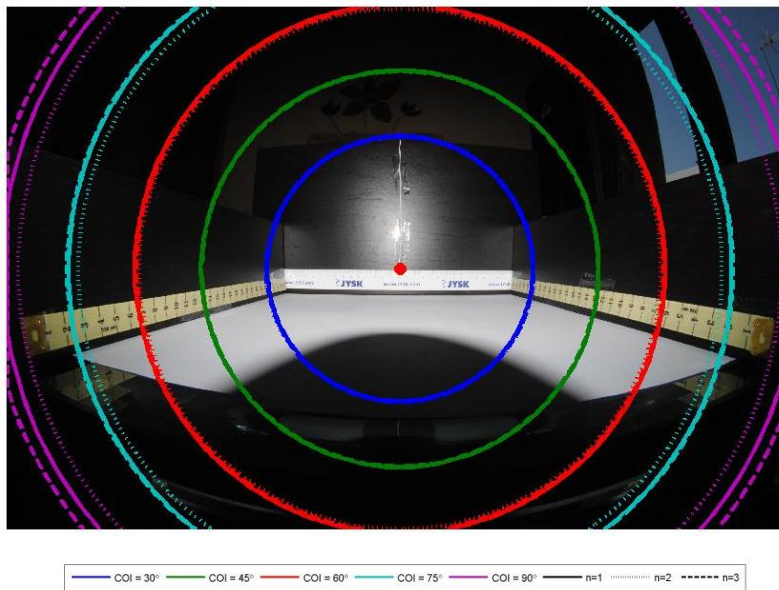


Figura 3.32. Resultado de la calibración de la lente ojo de pez

Para contrastar los resultados obtenidos de las imágenes hemisféricas, se realizaron medidas de *IAF* con el ceptómetro de Decagon AccuPAR LP-80. Este modelo es un ceptómetro lineal que mide la radiación fotosintéticamente activa (400-700 nm) incidente en 80 sensores localizados a 1 cm de intervalo a lo largo de una varilla de 80 cm de largo (figura 3.33). El microcontrolador interpreta las señales procedentes de cada sensor y da el valor promedio del segmento especificado.

El LP-80 calcula de forma instantánea el *IAF* de cada medida PAR (Radiación Fotosintética Activa, del inglés Photosynthetically Active Radiation) realizada con base en el cociente (PAR_z/PAR_0) y en el coeficiente de extinción lumínico de la cubierta (K), a través de la ecuación de Beer-Lambert (Ecuación 3.5) (Vose y Swamk, 1990):

$$IAF = -\ln \frac{\tau}{K} \quad (3.5)$$

siendo τ la probabilidad de que un rayo penetre el dosel. Pero hay un par de factores de complicación, ya que para la obtención de esta ecuación se asumió que las hojas del dosel eran horizontales y que toda la radiación provenía directamente del sol. En realidad, el ángulo del sol cambia en el transcurso del día, y un dosel real tiene una arquitectura muy compleja. Además, parte de la radiación es dispersada. La ecuación completa para encontrar el índice de área foliar de una medida de la radiación fotosintéticamente activa incluye correcciones de todos estos factores (Ecuación 3.6):

$$IAF = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.47 f_b)} \quad (3.6)$$

3. Materiales y métodos

Esta ecuación ajusta la cantidad de luz absorbida (y no dispersa) por las hojas en el término A y la luz fracción que entra en el dosel como un haz (en contraposición a la luz difusa del cielo o las nubes) en el término f_b . K incluye variables que dependen del ángulo cenital del sol y de la distribución de las hojas. Si se especifica la ubicación y se configura el reloj interno con la hora local, el LP-80 calcula el ángulo cenital solar en el momento de cada medición. La distribución angular de la hoja se supone que es esférica a menos que se indique lo contrario.



Figura 3.33. Medida del IAF con el ceptómetro LP-80 en *Pinus pinea*.

3.4.3. NDVI

En el árbol “P_{M1}” se llevó a cabo la instalación de los sensores Decagon's Spectral Reflectance Sensor (SRS), que permiten la monitorización continua del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) del dosel de las plantas. El NDVI es un índice generalmente utilizado por los investigadores para monitorear la biomasa dosel, el área foliar, la fenología, la producción de biomasa y la eficiencia en el uso de la luz, entre otras variables (Paruelo, 2008).

El objetivo de esta medición es observar la variación del NDVI a lo largo del año, ya que se ha demostrado que se correlaciona bien con *IAF* (Aparicio et al., 2002), aunque tiene algunas limitaciones. Al igual que muchas técnicas no destructivas (por ejemplo, la fotografía hemisférica o el ceptómetro), la medición de NDVI se vuelve menos sensible cuando el *IAF* aumenta por encima de un cierto punto, siendo los cambios en el *IAF* difíciles de detectar cuando es mayor a 3 m²m⁻² (Nguy-Robinson, 2012).

Las mediciones NDVI se basan en la luz reflejada de la superficie foliar. A medida que el dosel es mayor y las hojas superiores comienzan a cubrir las hojas inferiores, el área foliar seguirá aumentando sin hacer una contribución adicional a la radiación reflejada. Además, la clorofila foliar es un absorbente muy eficiente de la radiación en longitudes de onda roja, de modo que la reflectancia de las hojas es muy baja en esta región. Por lo tanto, el aumento de *IAF* y del contenido de clorofila del dosel, no cambia sustancialmente la reflectancia roja, de ahí que la capacidad predictiva del NDVI de un dosel con alto *IAF* sea limitada.

El NDVI se calcula como la relación entre la radiación reflejada e incidente, medidas usando sensores orientados hacia el dosel (downlooking) y el cielo (uplooking), respectivamente. Los sensores “uplooking” tienen una visión hemisférica y deben ser montados por encima del dosel con una vista despejada del cielo, mientras que los sensores “downlooking” tienen restringido su campo de visión a 20°. Esta restricción permite apuntar el sensor a un objetivo específico y excluir elementos que no pertenecen al dosel. El sensor se puede montar para controlar árboles individuales, cultivos en hileras, parcelas o masas forestales. La altura del montaje determinará la zona de medición.

3. Materiales y métodos

En nuestro caso, los sensores se montaron por encima del dosel del pino “P_{M1}” mediante la utilización de un poste de 8 metros de altura, tal como se aprecia en la figura 3.34.



Figura 3.34. Instrumentación para la medida del NDVI en *Pinus pinea* (P_{M1})

3.4.4. Humedad del dosel

En los árboles situados en la zona del Arroyo Los Morales (P_{M1} y P_{M2}) se ha llevado a cabo la instalación de cuatro sensores de humedad de marca Decagon (Dielectric Leaf Wetness Sensor, LWS), tal como se muestra en la figura 3.34. Estos sensores se instalaron con el objetivo de determinar el tiempo de secado del dosel tras un evento de lluvia, ya que no existe un criterio estándar para la duración del período de secado. Una vez establecido el tiempo de secado, será posible identificar los diferentes eventos de lluvia, definiendo éste como la cantidad de precipitación que tiene lugar desde que comienza a llover hasta que el dosel se seca completamente.

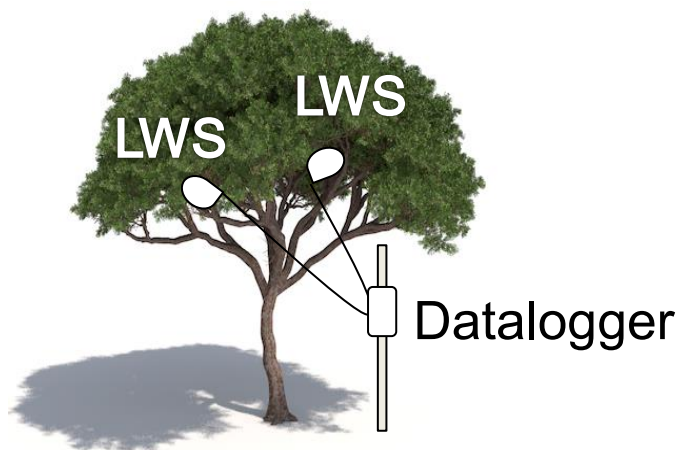


Figura 3.35. Esquema de los sensores de humedad instalados en *Pinus pinea*

Los LWS están diseñados para ser instalados en el dosel mediante dos agujeros que se encuentran en la parte posterior del sensor para su montaje. Mediante unas bridas el sensor se fija a una pequeña barra en forma de “U” que será anclada a una rama en el interior del dosel (figura 3.36).



Figura 3.36. Sensor de humedad instalado en *Pinus pinea* (P_{M1})

Los sensores de humedad miden la constante dieléctrica de la superficie superior del sensor. La constante dieléctrica del agua (80) y hielo (5) son mucho más altas que la del aire (1), por lo que la constante dieléctrica medida depende fuertemente de la presencia de humedad o escarcha sobre las superficies de los sensores. El sensor emite una señal en mV proporcional a la constante dieléctrica de la zona medida, y, por lo tanto, proporcional a la cantidad de agua o hielo en la superficie del sensor.

3.4.5. Humedad de suelo

Se han instalado 4 sondas de humedad SM200 de Delta-T (Delta-T Devices Ltd, 130 Low Road, Burwell, Cambridge, UK) distribuidas aleatoriamente bajo el dosel del pino P_{M2} , que registran el contenido de agua de la capa superficial del suelo cada 15 min. De igual modo, se instalaron dos sondas más junto a este árbol pero fuera de la proyección de su dosel, de tal forma que con los datos obtenidos se pueda estudiar la diferencia de humedad existente en el suelo bajo el árbol y fuera de éste (figura 3.37). Estos últimos sensores se instalaron dentro de unas pequeñas jaulas para proteger la instrumentación.



Figura 3.37. Sensores de humedad instalados en *Pinus pinea* (P_{M2})

3. Materiales y métodos

El mismo estudio realizado en *Pinus pinea* se realizó en *Cistus ladanifer*, instalando dos sondas bajo una planta de esta especie y otras dos junto a la misma planta pero fuera de su proyección (figura 3.38). Todos los sensores se instalaron igualmente dentro de unas pequeñas jaulas.



Figura 3.38. Sensores de humedad instalados en *Cistus ladanifer*.

A pesar de que el sensor SM200 está provisto de calibraciones generales para suelos minerales y orgánicos que se pueden utilizar para convertir la salida del sensor directamente en la humedad del suelo, es recomendable realizar previamente la calibración de estos sensores.

Los sensores SM200 miden la humedad volumétrica del suelo, θ , mediante la detección de las propiedades dieléctricas del suelo húmedo, la permitividad, ε , o más concretamente el índice de refracción, que es equivalente a $\sqrt{\varepsilon}$. El índice de refracción medido por el SM200 sólo se ve afectado por los cambios en el contenido de agua, θ . Esta relación viene dada por la ecuación 3.7:

$$\sqrt{\varepsilon} = a_0 + a_1 * \theta \quad (3.7)$$

donde los coeficientes a_0 y a_1 son parámetros que caracterizan las propiedades dieléctricas de los suelos.

Para realizar la calibración previamente hay que recoger una muestra húmeda del suelo o sustrato a analizar. El primer paso será insertar el sensor SM200 en la muestra húmeda y registrar su salida en voltios (V_w), tal como se muestra en la figura 3.39. Seguidamente esta muestra debe pesarse en campo o bien debe permanecer sin cambios hasta que se realiza su pesada en el laboratorio (W_w). El volumen de la muestra (L_s) también es un dato que debe ser conocido.



Figura 3.39. Muestra de suelo para la calibración de los sensores de humedad.

El siguiente paso será secar la muestra. Esto se consigue normalmente manteniéndola en el horno a 105 ° C durante varias horas o días (el tiempo necesario depende del tamaño y porosidad de la muestra). Una vez que la muestra se ha secado completamente ha de ser pesada de nuevo (W_0) y se ha de volver a insertar el sensor SM200 en la muestra y registrar esta lectura (V_0).

El sensor SM200 se ajusta partir de la ecuación 3.8:

$$\sqrt{\varepsilon} = 1,0 + 16.103V - 38.725V^2 + 60.881V^3 - 46.032V^4 + 13.536V^5 \quad (3.8)$$

donde V es la salida del sensor SM200 en voltios. En el suelo seco $V = V_0$, y sustituyendo este valor en la ecuación anterior se obtiene el valor de $\sqrt{\varepsilon_0}$. Ya que en este caso $\theta_0 = 0$, se tiene el valor del coeficiente a_0 .

El contenido de agua del suelo húmedo, θ_w , se puede calcular a partir del peso del agua que se pierde durante el secado ($W_w - W_0$) y su volumen, L_s (ecuación 3.9):

$$\theta_w = (W_w - W_0)/L_s \quad (3.9)$$

En el suelo húmedo $V = V_w$, y aplicando nuevamente la ecuación 3.8 obtenemos el valor de $\sqrt{\varepsilon_w}$. Finalmente, a partir de la ecuación 3.10, se obtiene el valor del parámetro a_1 :

$$a_1 = (\sqrt{\varepsilon_w} - \sqrt{\varepsilon_0})/(\theta_w - \theta_0) \quad (3.10)$$

3. Materiales y métodos

3.4.5. Datos meteorológicos

Los datos climáticos de velocidad del viento, radiación solar, temperatura y humedad relativa, necesarios para el cálculo de la intensidad de evaporación potencial, proceden de la estación meteorológica que existe en la cuenca de “El Cabril”, que toma datos en intervalos horarios de tiempo.

La disponibilidad de estos datos en intervalos horarios limita la posibilidad de aplicar los modelos de interceptación a intervalos de tiempo inferiores, principalmente las versiones del modelo de Rutter. En Febrero de 2015 se instaló una nueva estación meteorológica próxima a los pinos P_M1 y P_M2 , que proporciona datos de velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa en intervalos de 10 minutos permitiendo evitar esta limitación (figura 3.40).



Figura 3.40. Estación meteorológica instalada en la zona del Arroyo de los Morales.

3.5. Análisis de la modelación

Los modelos de interceptación utilizados en este trabajo son el modelo conceptual de Rutter et al. (1971) y el modelo analítico de Gash (1979), junto con revisiones de estos modelos realizadas por Valente et al. (1997).

3.5.1. Modelo de Rutter

Rutter et al. (1971) desarrollaron un modelo para predecir la evaporación interceptada por la lluvia en bosques, derivado de las observaciones realizadas en un bosque de pino al SE de Inglaterra. El modelo Rutter representa el proceso de interceptación como un balance de agua que consiste en una entrada de agua de lluvia, el almacenamiento en el dosel y la salida en forma de drenaje o evaporación. Las tasas de drenaje y evaporación dependen de la cantidad de agua almacenada en el dosel, que varían a lo largo del evento, y se estiman a partir de variables y parámetros tanto meteorológicos como de la masa forestal. Posteriormente, Rutter et al. (1975) desarrollaron la versión definitiva del modelo en la que consideraban la escorrentía cortical, de forma que una fracción de la precipitación se desvía directamente a los troncos. El principal problema práctico es el alto requerimiento de datos del modelo.

El esquema conceptual del modelo original de Rutter aparece representado en la figura 3.41. Como puede verse, 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_t) supera a la capacidad de almacenamiento del mismo (S_t), se produce un nuevo flujo denominado escorrentía cortical (S_f); por último, la cantidad de lluvia que incide en el dosel, calculada como el producto de la precipitación bruta por los componentes ya descritos ($1 - p - p_t$). 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 el total de la trascolación.

El modelo estima la trascolación, la escorrentía cortical y la interceptación a partir de la precipitación bruta y la evaporación en el dosel y en el fuste, basándose en un

3. Materiales y métodos

cálculo del balance de agua en el dosel y el fuste, a partir de las ecuaciones (3.11) y (3.12):

$$(1 - p - p_t) \int P_g dt = \int D dt + \int E_c dt + \Delta C \quad (3.11)$$

$$p_t \int P_g dt = S_f + \int E_t + \Delta C_t \quad (3.12)$$

, 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.

La tasa de goteo o de drenaje del dosel (D) vendrá dada por la siguiente expresión (ecuación 3.13):

$$D = \begin{cases} D_0 \exp(bC) & \text{si } C \geq S \\ 0 & \text{si } C < S \end{cases} \quad (3.13)$$

, donde D_0 es la tasa de drenaje cuando el dosel está saturado, y b es un coeficiente empírico.

La evaporación del dosel húmedo se calcula con la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Cuando la cantidad de lluvia que incide en el dosel (C) es menor que la capacidad de almacenamiento del dosel (S), la evaporación es calculada según la expresión: $E_p \cdot \frac{C}{S}$. El mismo concepto se aplica en los troncos, aunque en este caso, la evaporación del dosel se multiplica por la constante adimensional ε , que relaciona la evaporación desde el dosel con la evaporación desde el fuste cuando el dosel está saturado. ε se mueve en el rango de 0.01-0.05, el cual fue hallado experimentalmente y que para coberturas boscosas se reporta un valor apropiado para utilizar en modelación de 0.03 (Rutter et al., 1971).

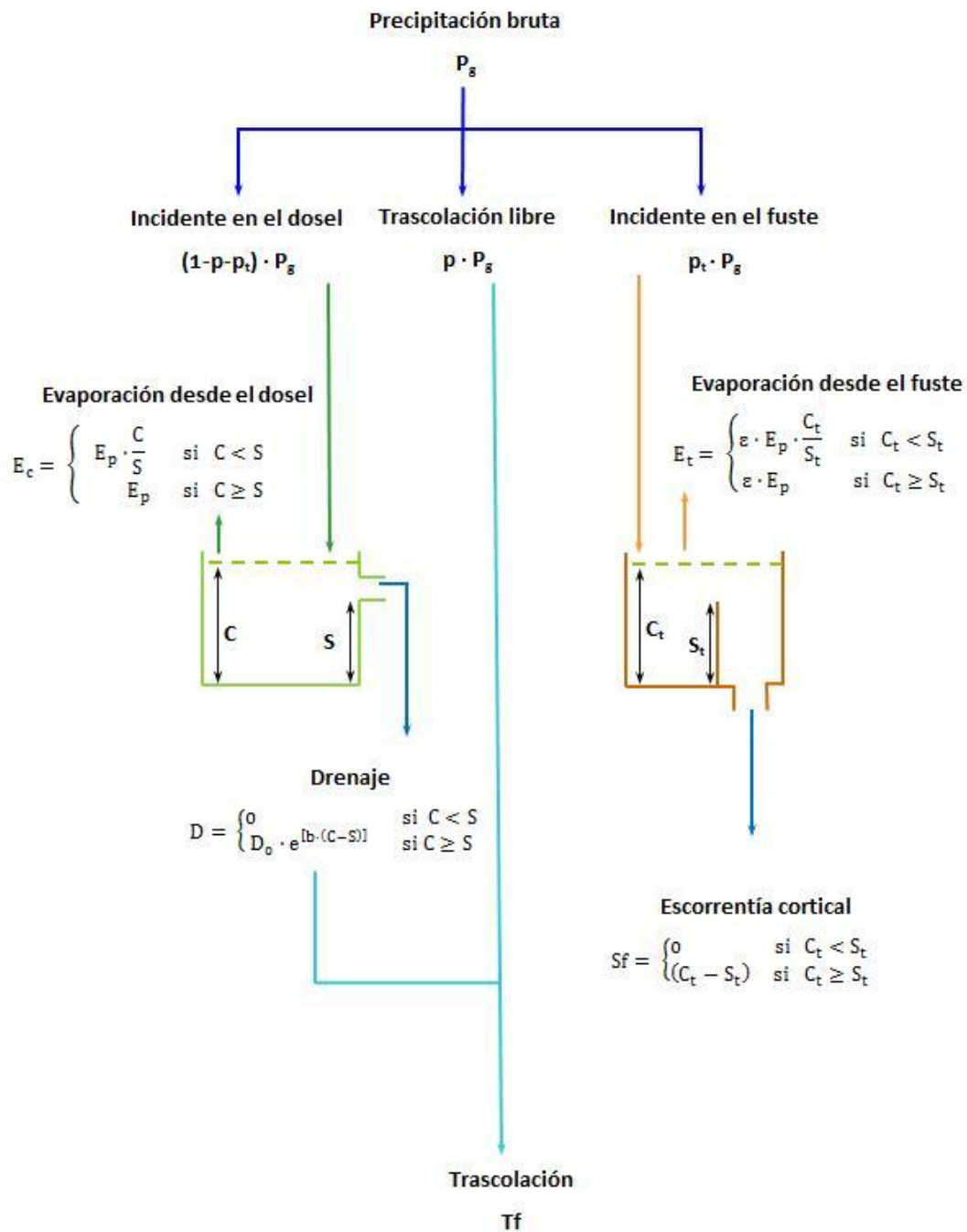


Figura 3.41. Esquema del modelo de Rutter.

3.5.2. Modelo de Gash

Gash (1979) propuso un modelo analítico más simple basado en eventos de lluvia. Éste incorpora algunas simplificaciones de los modelos de regresión lineal, pero manteniendo los conceptos físicos fundamentales del modelo de Rutter. El modelo de Gash requiere de una menor cantidad de datos meteorológicos, porque aplica valores constantes de intensidad de lluvia media y evaporación media durante el periodo de

3. Materiales y métodos

simulación. Este modelo ha funcionado con éxito en una amplia variedad de condiciones (Gash et al., 1980; Dolman, 1987; Lloyd et al., 1988; Limousin et al., 2008).

Este modelo considera que las precipitaciones ocurren como una serie de eventos de lluvia discretos, separados entre sí por un tiempo suficientemente largo como para que la planta quede completamente seca. Cada evento consta de tres fases distintas: una fase humectante, desde el inicio de la precipitación hasta que el dosel está saturado; una fase de saturación y una fase final de secado, que dura desde el final de la precipitación hasta que el dosel y los troncos estén completamente secos.

El modelo de Gash hace una distinción entre las tormentas que no son lo suficientemente grandes como para saturar el dosel ($P_g < P_s$: m tormentas) y las tormentas que saturan el dosel ($P_g > P_s$: n tormentas). La cantidad de lluvia bruta necesaria para saturar el dosel es P_s (ver Tabla 3.5.).

Tabla 3.5. Componentes del modelo de interceptación de lluvia de Gash.

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

3.5.3. Modelo de Gash revisado

El modelo propuesto por Gash et al. (1995), realiza una modificación del modelo original, con una mejor descripción del fenómeno de evaporación para bosques poco densos, debido a que el modelo original no era suficiente para describir el proceso de interceptación en este tipo de coberturas.

Este modelo requiere una estimación de la evaporación tanto por unidad de área del dosel, como por unidad de área del suelo (Tabla 3.6.). Cuando la evaporación por unidad de área del dosel es igualada a la estimación de evaporación hecha con la ecuación de Penman Monteith del modelo original, se realiza una mejora en la descripción de las observaciones (Gash et al, 1995). Se supone que tanto las capacidades de almacenamiento del dosel y del fuste como la intensidad de evaporación media adquieren un nuevo valor dependiente de la fracción de cobertura del dosel, c (Ecuaciones 3.14, 3.15 y 3.16):

$$S_c = \frac{S}{c} \quad (3.14)$$

$$S_{t,c} = \frac{S_t}{c} \quad (3.15)$$

$$\bar{E}_c = \bar{E} \cdot c \quad (3.16)$$

El modelo anterior falla en la modelación del humedecimiento del dosel en el momento en que $(1 - p - p_t)\bar{R} < \bar{E}$, ya que resulta en un logaritmo negativo en el cálculo de la lluvia necesaria para saturar el dosel, P_s . La expresión propuesta por Gash et al. (1995) para el cálculo de P_s , viene dada por la ecuación (3.17):

$$P_s = - \frac{\bar{R} S}{\bar{E}_c c} \ln \left\{ 1 - \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}} \right\} \quad (3.17)$$

Se ha asumido que la evaporación para coberturas poco densas puede ser estimada de manera sencilla como una reducción de la evaporación calculada para el follaje completo en la proporción de la cobertura del follaje. Esta suposición asume implícitamente que la evaporación es unidimensional y que no existe interacciones horizontales o advección.

Otra importante modificación del modelo, es que Gash et al. (1995), de manera similar a Valente et al. (1997), consideran que solamente incide agua en el fuste una vez se haya saturado el dosel. Esto se refleja en el cálculo de la evaporación desde el tronco, donde en el modelo original se calculan las pérdidas considerando sólo aquellos eventos

3. Materiales y métodos

que no saturan el fuste y, en esta nueva versión, se calcula para aquellos eventos que aun saturando el dosel no son suficientes para saturar el fuste.

Tabla 3.6. Componentes del modelo de interceptación de lluvia revisado Gash (1995).

Componentes de la pérdida por interceptación	Formulación
Para m tormentas pequeñas incapaces de saturar el dosel	$c \sum_{j=1}^n P_{gj}$
Humedecimiento del dosel, para n tormentas $> P_s$ suficientes para saturar el dosel	$ncP_{sj} - ncS_c$
Evaporación desde saturación antes de que la lluvia cese	$\left(\frac{c\bar{E}_c}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P_{gj} - P_s)$
Evaporación después de que termina la lluvia	ncS_c
Evaporación desde los troncos, para q tormentas donde $P_g > S_t/\rho_t$ suficiente para saturar el tronco	qS_c
Evaporación para n+m-q que no satura el tronco, donde $P_g < S_t/\rho_t$	$p_t \sum_{j=1}^{m-q} P_{gj}$

3.5.4. Modelos de Valente et al. (1997)

Cuando los modelos de Rutter y Gash eran aplicados en vegetación dispersa, se comprobó que sobreestimaban las pérdidas por interceptación (Lankreijer et al., 1993; Gash et al., 1995; Valente et al., 1997). Esto condujo a la revisión de ambos (Gash et al., 1995; Valente et al., 1997) teniendo en cuenta el grado de cobertura de la vegetación.

En estas versiones de los modelos para vegetación dispersa, la evaporación desde la cubierta húmeda se considera linealmente dependiente de la fracción de cobertura vegetal (*c*). Las versiones revisadas permiten simular adecuadamente las pérdidas por interceptación tanto en cubiertas dispersas como cerradas, teniendo en cuenta que cuando la cobertura vegetal es del 100%, la versión revisada se reduce a la original. Aplicaciones recientes del modelo de Gash revisado confirman que las predicciones del modelo son buenas en cubiertas con diferentes grados de cobertura (Gash et al., 1995; Valente et al., 1997; Asdak et al., 1998; Carlyle-Moses y Price, 1999; Jackson, 2000).

3.5.4.1. Modelo de Rutter Sparse (Valente et al., 1997)

El modelo de Rutter después de las modificaciones introducidas por Valente et al. (1997) para adaptarlo a masas forestales poco densas, aparece esquematizado en la figura 3.42. Se puede observar que esta versión del modelo de Rutter divide en dos subáreas la zona de estudio: una zona descubierta y otra zona cubierta, que comprende dosel y fuste. A pesar de tener una estructura similar al modelo original, en este caso los cálculos se aplican de forma independiente en cada una de las subáreas. Además, considera que solamente incidirá agua en el fuste una vez se haya saturado el dosel, desviándose el exceso de agua hacia el fuste o cayendo al suelo mediante el drenaje, para lo cual aparece un nuevo parámetro, p_d , que se corresponde con la proporción de lluvia que se desvía hacia el tronco.

En esta versión del modelo de Rutter, la evaporación desde el área cubierta por vegetación se estimará como E_p . La evaporación desde las áreas descubiertas se asumirá como cero. Esto conlleva a que la evaporación se reduzca en proporción al área cubierta únicamente. Teniendo en cuenta que la evaporación desde los troncos se calcula como εE_p , la evaporación desde el dosel se estimará como $(1 - \varepsilon E_p)$. Además, se sustituye la ecuación exponencial que describía el drenaje en la versión original, por una ecuación lineal. Esto evita trabajar con los parámetros D_0 y b , los cuales son extrapolaciones y relaciones matemáticas de las capacidades de almacenamiento y tasas de goteo de los experimentos realizados por Rutter et al (1971), que podrían conducir a errores.

Al igual que en Gash et al. (1995), son redefinidos los parámetros de capacidad de almacenamiento del dosel (S), capacidad de almacenamiento del fuste (S_f) e intensidad de evaporación media (\bar{E}) como, S_c , $S_{f,c}$, y \bar{E}_c respectivamente.

3. Materiales y métodos

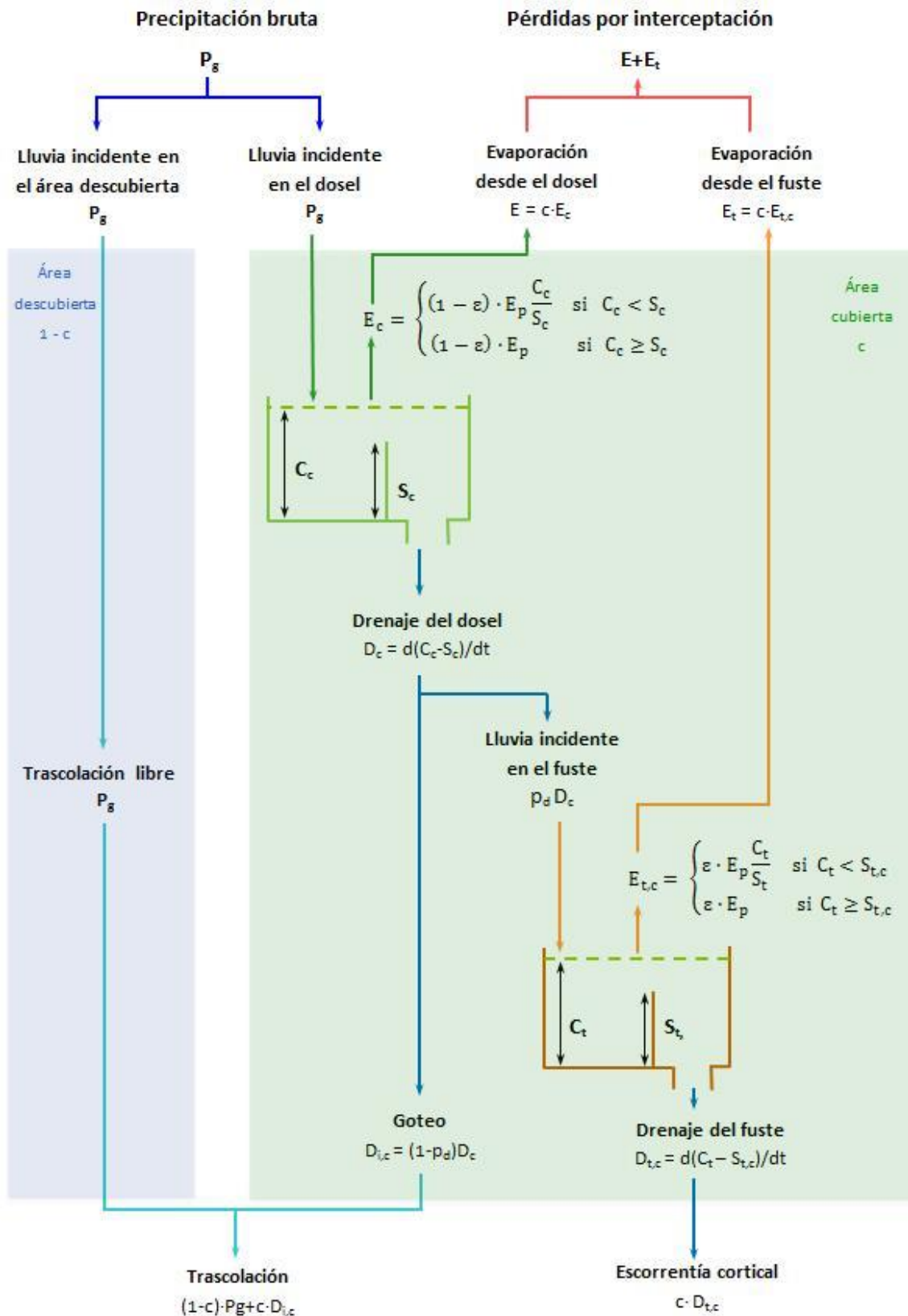


Figura 3.42. Esquema del modelo de Rutter Sparse (a partir de Valente et al. (1997)).

3.5.4.2. Modelo de Gash Sparse (Valente et al., 1997)

Valente et al. (1997) presentaron algunas modificaciones al modelo ya reformulado de Gash et al. (1995), con la intención de realizar un tratamiento similar al presentado en el modelo de Rutter modificado (Valente et al., 1997).

Las incorporaciones en este modelo son menos significativas, debido a que la versión revisada de Gash et al. (1995) ya contaba con la división de la zona de estudio en dos subáreas, y se reducen al parámetro p_d y a la reducción de la evaporación desde el dosel en $(1 - \varepsilon)$. Estos parámetros también afectan a las expresiones para el cálculo de la cantidad de lluvia necesaria para saturar el dosel (P'_g) y el fuste (P''_g) (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Componentes del modelo de interceptación de Gash Sparse (Valente et al., 1997).

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

3.5.5. Determinación de parámetros

El primer paso para aplicar los modelos de interceptación consiste en determinar los coeficientes que participan en ellos: la precipitación de saturación (P_s), la capacidad de almacenamiento del dosel (S) y del tronco (S_t), el coeficiente de trascolación libre (p) y la proporción de lluvia que se desvía hacia el tronco (p_t). Estos parámetros han sido determinados por métodos gráficos representando las medidas de trascolación, escorrentía cortical o interceptación frente a la precipitación bruta y determinando la recta de ajuste. En cada caso, según la metodología empleada se consideran eventos de precipitación diferentes (por ejemplo, precedidos por un determinado número de horas de lluvia, por encima o por debajo de un valor umbral; etc.) y la pendiente o el punto de corte de la recta de regresión con los ejes determinan el parámetro buscado. Evidentemente, cuanto mejor sea el ajuste de la recta mayor será la fiabilidad del coeficiente obtenido y mejores serán los resultados esperados al estimar la interceptación (Pérez Arellano et al., 2015c).

Precipitación de saturación, capacidad de almacenamiento del dosel y coeficiente de trascolación libre

La primera metodología empleada para la determinación de los parámetros de los modelos de interceptación fue la propuesta por Saxena (1986). En este caso, se parte de la representación gráfica de la trascolación frente a la precipitación (Leyton et al., 1967; Gash y Morton, 1978), correspondiente a eventos de lluvia precedidos por al menos 24 horas sin lluvia (tiempo supuestamente necesario para que se seque completamente el dosel). Con este método se busca el punto de inflexión dado por los eventos en los cuales la precipitación es suficiente para saturar el dosel (P_s). A la derecha del punto de inflexión, se ha alcanzado la capacidad de almacenamiento del dosel y las gotas de lluvia posteriores provocan su desbordamiento, por lo que la trascolación podría expresarse como: $Tr = R - E$. La pendiente de la recta a partir de este punto idealmente debe ser igual a 1, ya que una vez que se satura el dosel, la evaporación es insignificante si continúa la precipitación (generalmente se asume un valor de E durante la lluvia de 0,1 mm/h). La dispersión de los puntos a la derecha del punto de inflexión respecto a la recta 1:1 se debe principalmente a la variación en la evaporación del dosel húmedo (Leyton, 1967). Tal como lo propone Gash y Morton (1978), el procedimiento a seguir consiste en trazar por encima de todos los puntos seleccionados una línea recta de pendiente la unidad, que permitirá determinar la

capacidad de almacenamiento del dosel (S) a partir de la intercepción negativa de esta recta con el eje de ordenadas (T_f) (Lloyd et al., 1988).

El coeficiente de traslación libre (p), es la proporción de lluvia que cae directamente a través del dosel, y se obtiene a partir de la representación gráfica de la traslación frente a la precipitación incidente para eventos suficientemente pequeños que no saturan el dosel, es decir, los puntos a la izquierda del punto de inflexión mencionado anteriormente (Rutter et al. 1975; Gash y Morton 1978), donde la traslación se puede expresar como: $Tr = p R$.

La precipitación de saturación P_s , puede calcularse de nuevo a partir de la ecuación 3.18, ya que los valores de S y p ahora son conocidos, por lo que se podrá saber si la estimación gráfica de P_s obtenida en un principio es correcta.

$$S = (1 - p)P_s \quad (3.18)$$

Se ha utilizado una segunda metodología para la estimación de estos parámetros, la propuesta por Klaassen et al. (1998), que permite obtener los valores de la precipitación de saturación, de la capacidad de almacenamiento del dosel y del coeficiente de traslación libre, a partir de la división en dos partes de la representación gráfica de I frente a P : por una parte los eventos de lluvia insuficiente para saturar el dosel, donde $P < P_s$, y por otra parte los eventos en los que se satura el dosel, es decir, cuando $P \geq P_s$.

Se admite que durante los eventos en los que $P < P_s$ no hay drenaje desde el dosel y la interceptación, por tanto, viene dada por la ecuación 3.19:

$$I = P(1 - p) \quad (3.19)$$

Cuando los eventos de precipitación saturan el dosel ($P \geq P_s$), se da la situación de que C puede superar temporalmente a S durante la lluvia, aunque este exceso drena rápidamente. Una vez que la lluvia cesa, se puede suponer que $C=S$. Si además se acepta una relación constante entre E y R durante la lluvia (Gash, 1979), la interceptación en estos eventos puede ser expresada según la ecuación 3.20:

$$I = \left(1 - p - \frac{E}{R}\right) P_s + \left(\frac{E}{R}\right) P \quad (3.20)$$

Una vez se representan la intercepción y la precipitación para los eventos donde $P \geq P_s$, se obtiene una regresión lineal del tipo $I = \alpha P + \beta$, que permite estimar la

3. Materiales y métodos

intensidad de evaporación $\alpha = E/R$, y la capacidad de almacenamiento del dosel $\beta = \left(1 - p - \frac{E}{R}\right) P_s = S$.

Finalmente los valores de P_s obtenidos con los métodos anteriores se contrastarán con el valor obtenido de las expresiones propuestas por Gash (1979) y por Valente et al. (1997) para la estimación de la precipitación de saturación en la versión original y modificada del modelo de Gash, respectivamente (ecuaciones 3.21 y 3.22):

$$P_s = - \left(\frac{\bar{R}S}{E}\right) \ln \left\{ 1 - \left(\frac{E}{\bar{R}}\right) (1 - p - p_t)^{-1} \right\} \quad (3.21)$$

$$P_s = - \frac{\bar{R}}{(1-\varepsilon)\bar{E}_c} \frac{S}{c} \ln \left\{ 1 - \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right\} \quad (3.22)$$

Capacidad de almacenamiento del fuste y proporción de lluvia que se desvía hacia el tronco

Los parámetros de escorrentía cortical utilizados en los modelos, S_t y p_t , se obtienen siguiendo la metodología de Leyton (1967), como el punto de corte con el eje de ordenadas y la pendiente, respectivamente, de la recta de regresión entre la escorrentía cortical y la precipitación incidente. De acuerdo con el método descrito por Valente et al. (1997), los parámetros de escorrentía cortical para las versiones modificadas de los modelos (S_t y p_d) se estimaron a partir de la recta de regresión lineal obtenida entre las medidas de escorrentía cortical y la expresión $(T_f - (1 - c)P)$.

Parámetros de drenaje

También se precisan los parámetros de drenaje D_0 (tasa de drenaje cuando $C=S$) y b (coeficiente de drenaje), que se utilizan para describir el goteo desde el dosel, como se ha visto en la ecuación 3.13.

Originalmente el modelo de Rutter se aplicó en un bosque de *Pinus nigra*, obteniéndose un valor de $D_0 = 0.0019$ mm/min. Para otras coberturas con diferente LAI, tal valor podría ser 0.0019 LAI/LAI_c , donde LAI_c sea el índice de área foliar del bosque de pino de Rutter (Santiago Hernández, 2007). Asumiendo que S es directamente proporcional al LAI y conocido el valor de S para el bosque de *Pinus nigra* ($S=1.05$ mm) obtenido por Rutter et al. (1971), la intensidad de drenaje para otras cubiertas vegetales puede ser obtenida relacionándola con los valores de la capacidad de almacenamiento del dosel de cada una de ellas (Rutter y Morton, 1977; Lloyd et al., 1988; Jetten, 1996)

De acuerdo a lo anterior, se deducen las siguientes expresiones (ecuación 3.22 y 3.23):

$$D_0 = \frac{0.0019}{1.05S} = 0.0018S^{-1} \quad (3.22)$$

$$b = 3.7 \frac{1.05}{S} = 3.89S^{-1} \quad (3.23)$$

3.5.6. Mejoras metodológicas realizadas en esta tesis

En el presente trabajo se han introducido nuevas modificaciones en los modelos de interceptación de Rutter original (1971) y en su versión modificada por Valente et al. (1997), consistentes en establecer límites a la evaporación y al drenaje del dosel, puesto que los resultados obtenidos para estos componentes, en algunos casos, excedían a la precipitación bruta. Estas adaptaciones del modelo de Rutter original y del modelo de Rutter modificado por Valente et al. (1997), realizadas en el presente trabajo, se muestran en las figuras 3.43 y 3.44, respectivamente.

En caso del modelo de Rutter original, 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 (Ecuación 3.24), si la precipitación incidente en el dosel es inferior a la cantidad de agua que puede almacenar entonces se evapore todo el agua que incide y, si por el contrario, se satura el dosel, la cantidad de agua que se evapore sea como máximo la cantidad de agua que es capaz de retener el dosel.

$$E = \begin{cases} \min(E_p, S) & \text{si } C \geq S \\ \min\left(E_p \cdot \frac{C}{S}, S\right) & \text{si } C < S \end{cases} \quad (3.24)$$

Cuando la precipitación que incide en el dosel excede la capacidad de almacenamiento del mismo tiene lugar el drenaje mediante el cual este exceso de agua cae al suelo. Sin embargo, si se determina la cantidad de agua que alcanza el suelo por este fenómeno utilizando la ecuación del modelo original, puede ocurrir que, si la cantidad de lluvia que incide en el dosel es mucho mayor que la capacidad de almacenamiento del mismo, el resultado sea una cantidad infinita. Por ello, en el presente trabajo se han seguido las recomendaciones propuestas por Gerrists (2010) de

3. Materiales y métodos

limitar, en esos casos, el drenaje a la cantidad de agua que excede de la capacidad de almacenamiento del dosel (Ecuación 3.25).

$$D = \begin{cases} \min(D_0 \cdot e^{[b \cdot (C-S)]}, C - S) & \text{si } C \geq S \\ D = 0 & \text{si } C < S \end{cases} \quad (3.25)$$

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 3.26).

$$E_t = \begin{cases} \min(\varepsilon \cdot E_p, S_t) & \text{si } C_t \geq S_t \\ \min(\varepsilon \cdot E_p \cdot \frac{C_t}{S_t}, C_t) & \text{si } C_t < S_t \end{cases} \quad (3.26)$$

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.

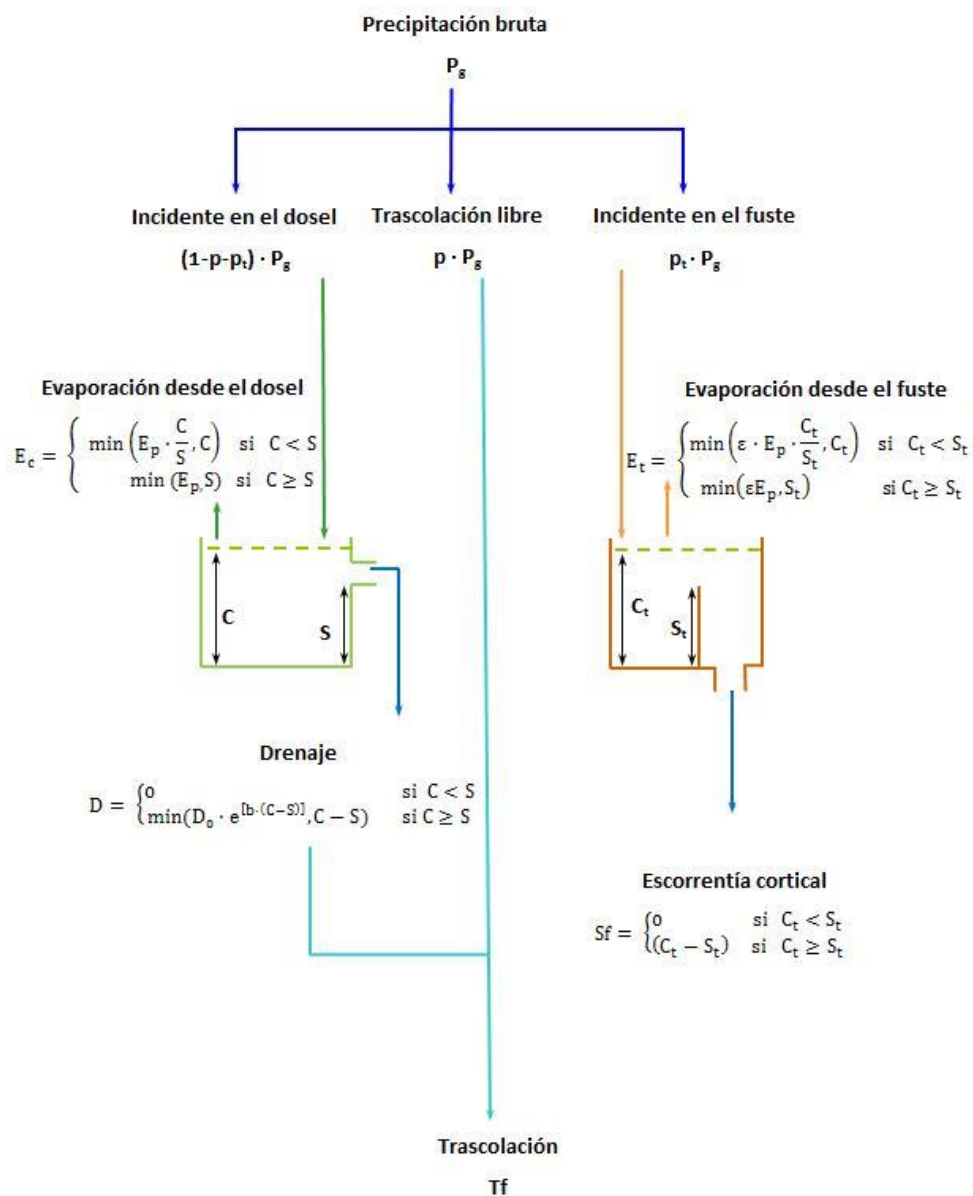


Figura 3.43. Adaptación del modelo de Rutter.

En la versión del modelo de Rutter modificada por Valente et al. (1997), el problema del drenaje expuesto en el modelo original desaparece, porque considera que toda la lluvia que incide sobre el dosel una vez que éste está saturado se pierde bien por goteo o bien escurriendo por las ramas y el fuste hasta alcanzar el suelo. Sin embargo, los problemas de la evaporación no se han corregido a pesar de la modificación introducida por Valente et al. (1997), por lo que, al igual que en caso de la versión original, la modificación propuesta consiste en establecer límites a las pérdidas por evaporación, impidiendo que las pérdidas por interceptación sean superiores a la cantidad de lluvia que incide sobre el dosel (Ecuación 3.27) o sobre el fuste (Ecuación

3. Materiales y métodos

3.28) cuando ésta no supera las capacidades de almacenamiento de los mismos y, en el caso de que se superen dichas capacidades, las pérdidas por interceptación se limitan a la cantidad de agua que es capaz de retener el árbol, bien en el dosel o bien en el fuste.

$$E = \begin{cases} \min((1 - \varepsilon) \cdot E_p, S_c) & \text{si } C_t \geq S_c \\ \min((1 - \varepsilon) \cdot E_p \cdot \frac{C_c}{S_c}, S_c) & \text{si } C_t < S_c \end{cases} \quad (3.27)$$

$$E_t = \begin{cases} \min(\varepsilon \cdot E_p, S_{t,c}) & \text{si } C_t \geq S_{t,c} \\ \min(\varepsilon \cdot E_p \cdot \frac{C_t}{S_{t,c}}, S_{t,c}) & \text{si } C_t < S_{t,c} \end{cases} \quad (3.28)$$

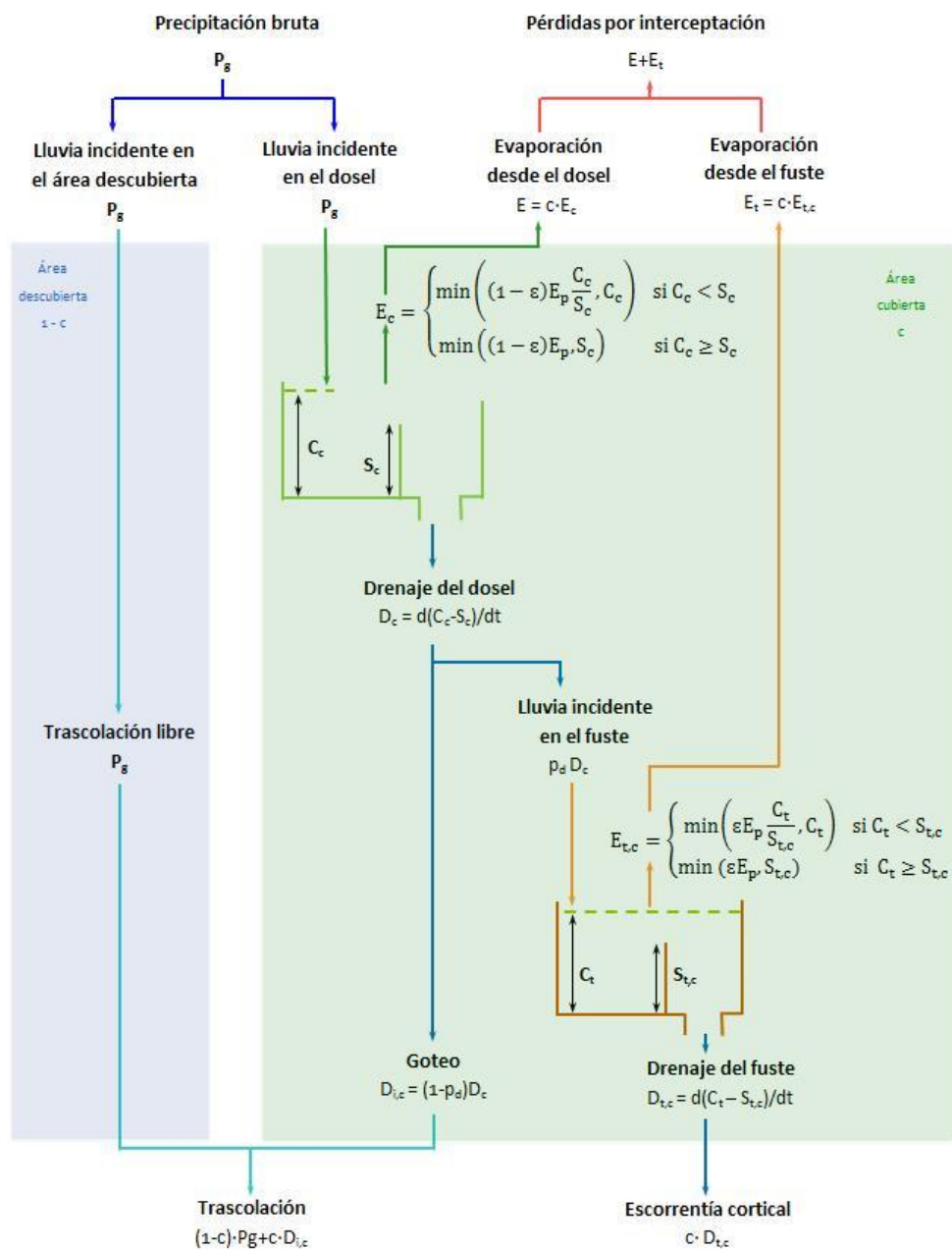


Figura 3.44. Adaptación del modelo de Rutter Sparse.

3.5.7. Validación de modelos

En esta etapa de validación se realizaron análisis entre los datos simulados y los registrados para cada variable del proceso de interceptación.

Se realizó un análisis comparando los porcentajes de cada una de las variables respecto al valor de precipitación total incidente. Con estos porcentajes se procedió a calcular su valor medio, desviación estándar, máximo y mínimos. También se estimó la diferencia de láminas de agua entre los valores simulados y los registrados acumulados durante el periodo de estudio.

A continuación, buscando evaluar la eficiencia de los modelos y procurando identificar cuál es el que tiene un mejor ajuste con los registros experimentales, se calcularon los estadísticos presentados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Estadísticos y sus expresiones matemáticas.

ESTADÍSTICO	ECUACIÓN
Raíz del error cuadrático medio	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}$
Raíz del error cuadrático medio normalizado	$RMSEN = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}}{\overline{OBS}}$
Coeficiente de eficiencia (Nash-Sutcliffe)	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2}$

El error medio cuadrático (*RMSE*) cuantifica el promedio cuadrático de los errores. El error es la diferencia entre los valores observados y los simulados. El error cuadrático medio normalizado (*RMSEN*) es el error cuadrático medio dividido entre el promedio de la variable observada. El coeficiente de eficiencia (*E*) se mueve en el rango desde $-\infty$ hasta 1 para un ajuste perfecto con los registros experimentales. Un valor de 0 indica que la exactitud de la predicción del modelo es similar a la media de los datos observados, y para valores menores a 0 es un indicativo que la media de los registros experimentales es un mejor predictor que el modelo implementado (Nash y Sutcliffe, 1970).

3. Materiales y métodos

Por último, se realizó un análisis gráfico de las salidas de los modelos para verificar que las diferencias entre los valores registrados y simulados acumulados fueran mínimas, estimando el coeficiente de determinación (R^2). Un valor de 1 en este estadístico indica una fuerte relación entre las dos variables aleatorias.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Influencia de las características climáticas sobre la interceptación

4.1.1. Medidas de precipitación

Para este estudio se han utilizado los datos de precipitación de la cuenca de “El Cabril” (ver apartado 3.4.5) entre el 1 de Septiembre de 2010 y el 31 de Julio de 2015. A continuación se muestra la distribución mensual de la precipitación durante este período (figura 4.1.1).

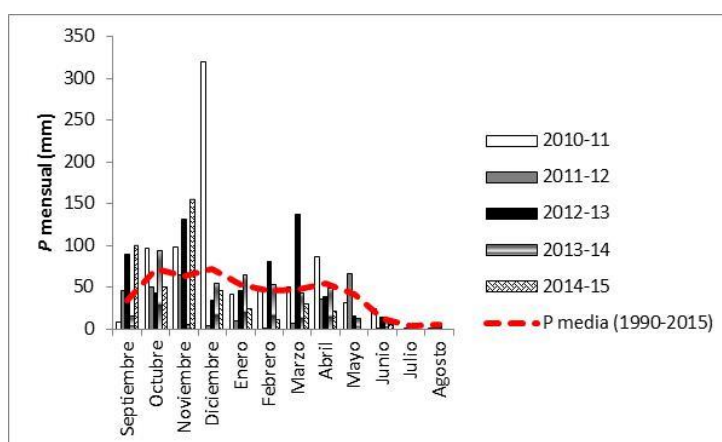


Figura 4.1.3. Cantidades mensuales de precipitación (P , mm).

Hay que destacar que durante estos cinco años se ha dado un comportamiento pluviométrico especial, ya que en el primer y tercer año la precipitación en la cuenca superó los 720 mm anuales, un 40% más de la media de los 25 últimos años (508.9 mm), periodo del que se disponen datos de esta estación instalada en 1990, mientras que el segundo año fue el más seco con una precipitación de 283,5 mm, y en los dos últimos años la precipitación media fue de 425.9 mm, lo que representa un 20% menos de la media. Estos datos ponen de manifiesto la gran variabilidad interanual de la lluvia, propia de un clima mediterráneo.

Se define un evento de precipitación como aquella lluvia más o menos continua en el tiempo y separada de la siguiente por un periodo seco de al menos 10 horas, suficiente como para suponer que la cubierta vegetal se haya secado completamente (Pérez Arellano et al., 2013). Este periodo seco varía según el tipo de clima y vegetación, y se ha estimado experimentalmente tal como se detalla en el apartado 4.3.2 de esta tesis.

Considerando un periodo de secado mínimo de 10 horas, se han registrado un total de 260 eventos de lluvia con intensidad mayor a 0,2 mm/h. Los eventos de precipitación se dividieron en cinco clases atendiendo a la cantidad de lluvia registrada: <5 mm, 5-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm y > 30 mm. La mayoría de los eventos fueron inferiores a 20 mm (83.8% del total), siendo los eventos de precipitación pequeños (<5 mm) los que se produjeron con más frecuencia (55.4% del total de eventos), aunque su contribución a la precipitación anual fue inferior al 9%. La intensidad media de la precipitación durante cada evento de lluvia varía desde 0.1 hasta 10.4 mm h⁻¹, con una intensidad máxima de 27.2 mm h⁻¹. Los eventos de larga duración fueron los más frecuentes (28,5%), y la lluvia acontecida durante los mismos representó casi el 75% de la precipitación total. El 67.7% de los eventos de las lluvias estuvieron acompañados de vientos del sur (14.4% S, 49.1% SE y 6.1% SO). La velocidad media del viento observada durante los eventos de precipitación varió principalmente entre 1 y 3 m s⁻¹, con vientos mínimos y máximos que alcanzaron 0.5 y 9 m s⁻¹, respectivamente.

En las siguientes gráficas (figura 4.1.2) se pueden observar las características de las precipitaciones acontecidas durante el período de estudio, en lo referente a su cantidad, intensidad media y duración de los eventos de lluvia, así como a la velocidad del viento.

4. Resultados y discusión

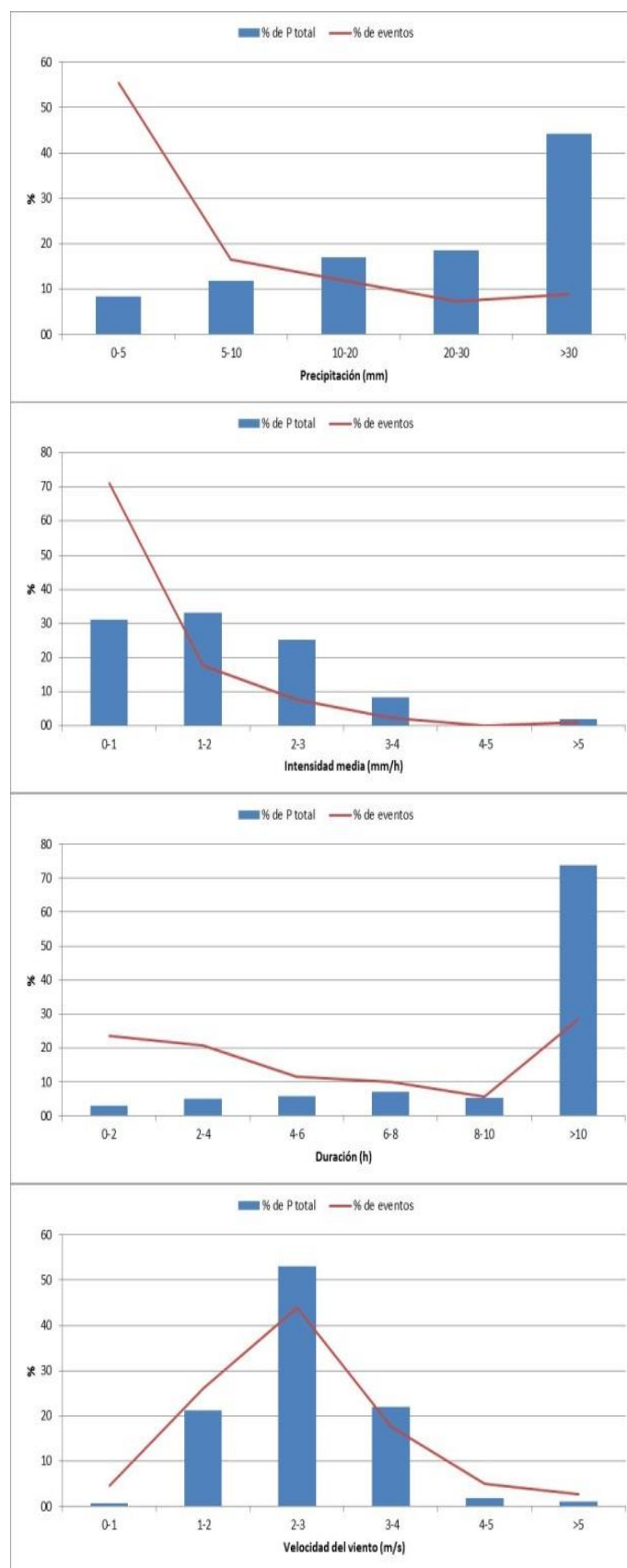


Figura 4.1.2. Distribución de frecuencias (porcentaje del volumen total de las precipitaciones y del número de eventos de lluvia) según la cantidad (a), intensidad (b) y duración (c) del evento de lluvia y de la velocidad del viento (d).

4.1.2. Medidas de interceptación

Desde Octubre de 2010 hasta Junio de 2015, han sido un total de 73 y 85 los episodios de lluvia identificados y analizados en los individuos de *Pinus pinea* “P_{M1}” y “P_{M2}”, respectivamente, mientras que en *Cistus ladanifer* fueron 66. No se han podido registrar algunas medidas 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 las tablas 4.1.1 y 4.1.2 se muestran los valores de trascolación, escorrentía cortical e interceptación, medidos en los individuos de pino y jara estudiados durante dichos episodios de lluvia.

En los dos últimos años se ha observado una interceptación muy similar en los ejemplares de *Pinus pinea*, mientras que en los primeros años fue muy diferente, lo que hace pensar que la metodología utilizada durante los tres primeros años en el ejemplar “P_{M1}” no fue la acertada (ver apartado 3.3.2). Posiblemente el plástico impermeable se fue degradando con el paso del tiempo, dejando escapar parte de la precipitación neta, lo que se tradujo en una medida de la trascolación inferior a la real, y, por tanto, en un porcentaje de interceptación muy elevado. Dadas estas circunstancias se ha optado por considerar como erróneas esas medidas y trabajar con los 85 episodios de lluvia identificados y analizados en “P_{M2}” durante todo el periodo de estudio y con los 37 episodios que se han registrado en el individuo “P_{M1}” desde Octubre de 2013, cuando se cambió la metodología para la medida de la interceptación.

Tabla 4.1.1. Valores anuales de las medidas acumuladas de precipitación bruta, trascolación, escorrentía cortical e interceptación registradas durante el período de Octubre de 2010 a Julio de 2015 en los individuos de *Pinus pinea* de la zona del Arroyo Los Morales

Parcela	P (mm)	Tr (mm)	S _f (mm)	I (mm)	I/P (%)
P _{M1} (2013-2014)	326,6	192,6	0,3	133,6	40,9
P _{M1} (2014-2015)	447,1	342,1	0,5	104,5	23,4
<i>Pinus pinea</i> P _{M1} (Total)	773,7	534,7	0,9	238,1	30,8
P _{M2} (2010-2011)	611	479,6	2,3	129,1	21,1
P _{M2} (2011-2012)	364,2	223,9	0,8	139,5	38,3
P _{M2} (2012-2013)	764,6	562,7	2,2	199,7	26,1
P _{M2} (2013-2014)	326,6	187,2	0,9	138,5	42,4
P _{M2} (2014-2015)	447,1	333,5	1,4	112,2	25,1
<i>Pinus pinea</i> P _{M2} (Total)	2513,5	1786,9	7,6	719	28,6

4. Resultados y discusión

Tabla 4.1.2. Valores anuales de las medidas acumuladas de precipitación bruta, trascolación, escorrentía cortical e interceptación registradas durante el período de Octubre de 2010 a Julio de 2015 en *Cistus ladanifer*

Parcela	P (mm)	Tr (mm)	S _f (mm)	I (mm)	I/P (%)
<i>Cistus ladanifer</i> (2010-2011)	238.8	169.4	44.6	24.9	10.4
<i>Cistus ladanifer</i> (2011-2012)	297.8	175.5	45.2	77.1	25.9
<i>Cistus ladanifer</i> (2012-2013)	470.6	325.8	75.1	69.8	14.8
<i>Cistus ladanifer</i> (2013-2014)	318.8	203	54.6	61.2	19.2
<i>Cistus ladanifer</i> (2014-2015)	326.5	242.7	57.1	26.7	8.2
<i>Cistus ladanifer</i> (Total)	1652.5	1116.3	276.5	259.8	15.7

La interceptación total en estos dos últimos años en “P_{M1}” fue de 238,1 mm, lo que representa el 30,8 % de la precipitación bruta. El volumen total de lluvia interceptado por el árbol “P_{M2}” durante todo el período de estudio fue 719 mm, el 28,6 % de la precipitación bruta, mientras que en *Cistus ladanifer* fue de 259,8 mm, es decir, el 15.7% de la precipitación bruta.

Existe una diferencia en la fracción de pérdida de interceptación de alrededor del 15% entre ambas especies, siendo la interceptación en el pino más elevada, ya que dispone de una mayor capacidad de la biomasa vegetal para almacenar agua. Por otra parte, factores como la resina secretada por *Cistus ladanifer*, ládano (Holder, 2007), y su escasa capacidad de almacenamiento hacen que disminuya la capacidad de interceptación de esta planta. Todo esto pone de manifiesto que la cantidad de agua de lluvia interceptada por el dosel varía según el tipo de vegetación. También se observa en la tabla la variabilidad interanual de los resultados, y vemos como en el primer y tercer año, cuando la precipitación anual bruta fue notablemente superior a los otros tres años, el porcentaje de interceptación aumentó considerablemente, lo que demuestra la necesidad de estudiar la incidencia de otras variables, como las climáticas, que también influyen en este proceso.

En la tabla 4.1.3 se muestra los valores de interceptación registrados en los pinos ubicados en la zona más antropizada de la cuenca en el último año de estudio, durante el cual se han obtenido datos de 19 episodios de lluvia.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 4.1.3. Valores anuales de las medidas acumuladas de precipitación bruta, trascolación e interceptación para el período de Septiembre de 2014 a Julio de 2015 en los individuos de *Pinus pinea* de la zona antropizada

Parcela	P (mm)	Tr (mm)	I (mm)	I/P (%)
P _A 1	468.4	412.8	55.6	11.9
P _A 2		385.2	83.2	20.2
P _A 3		394.4	74	19.2
P _A 4		398.3	70.1	17.8
P _A 5		411.7	56.7	14.2
P _A 6		401.2	67.2	16.3
P _A 7		393.9	74.5	18.6
P _A 8		321.3	147.3	26.1

Si se comparan estos valores con los obtenidos en la zona del Arroyo Los Morales, vemos que la capacidad de interceptación de estos ocho árboles es inferior a los otros dos, debido principalmente a que son árboles de menor tamaño. Esta influencia de las características del dosel en el proceso de interceptación se estudiará con más detalle en la sección 4.2 de esta tesis.

Al relacionar la pérdida relativa de agua por interceptación (%) con la precipitación, se ha observado que la función logarítmica es la más apropiada, por su mejor ajuste estadístico. La figura 4.1.3 representa los resultados de nuestras investigaciones en relación con el efecto de las precipitaciones sobre la intensidad de interceptación.

4. Resultados y discusión

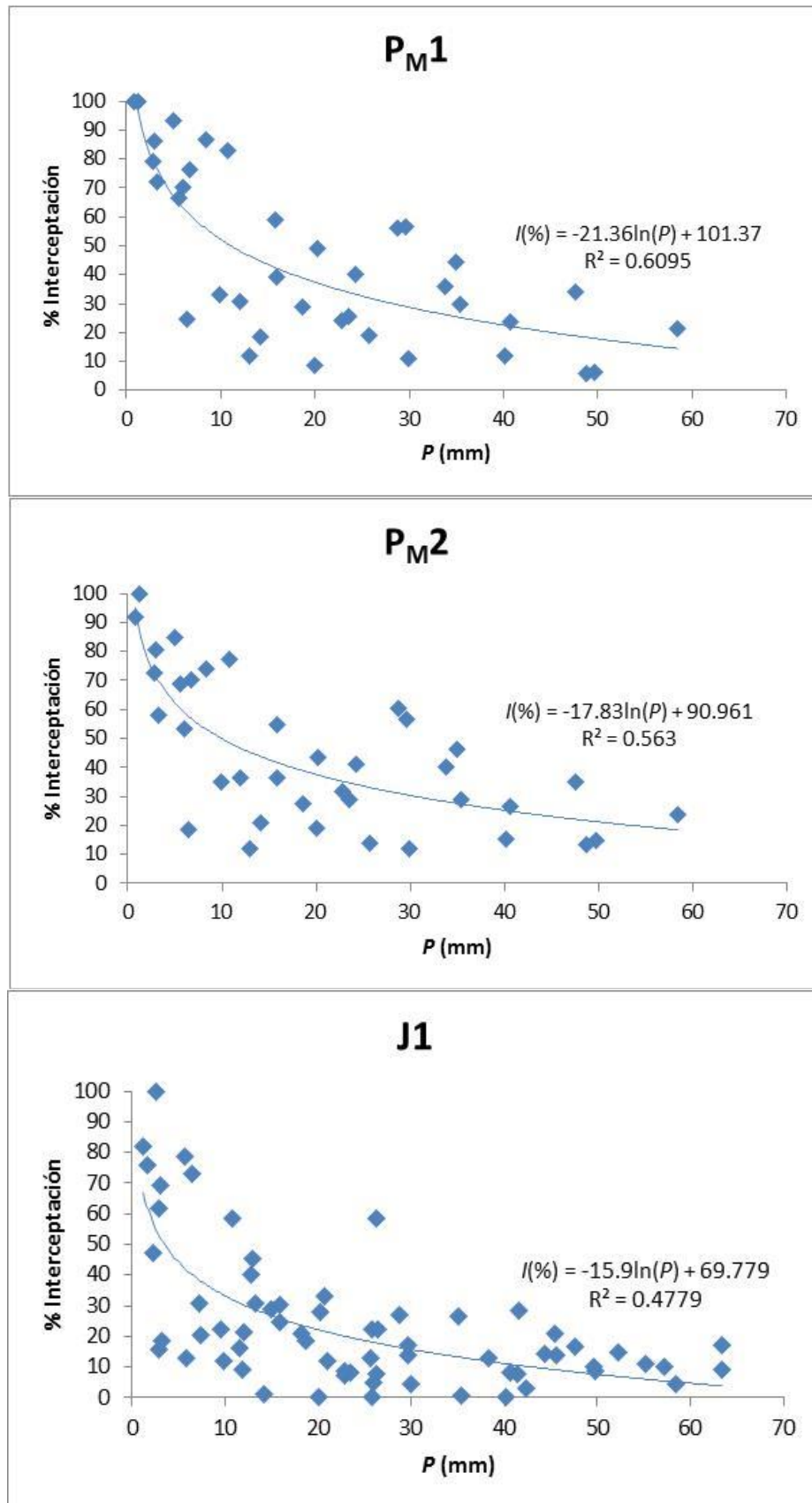


Figura 4.1.3. Relaciones entre la intensidad de interceptación (%) y la precipitación (mm) en *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

El porcentaje de interceptación en ambas especies alcanza valores muy elevados cuando las precipitaciones son bajas y disminuye a medida que aumenta el volumen de precipitación.

El porcentaje de interceptación obtenido en *Pinus pinea* es ligeramente superior a los valores publicados para otras especies de pino como *Pinus radiata*, donde se tienen valores del 18,3% (Crockford y Richardson, 2000) y del 10,4% (Huber y Oyarzún, 1984), *Pinus nigra*, con una interceptación del 8,5% (Domingo et al., 1994), o *Pinus patula*, donde la interceptación registrada por Bulcock y Jewitt (2012) fue del 21,4%. Nuestros resultados son más concordantes con los obtenidos por García Apaza (2005), que obtuvo un porcentaje de interceptación del 34,9% en *Pinus pinea* y del 30,9% en *Pinus halepensis*, y por Mazza et al. (2011) que registró una interceptación del 23,3% en un bosque de *Pinus pinea*. Llorens et al. (1997) en su estudio de la especie *Pinus sylvestris*, registró una interceptación del 32,5%.

La cantidad de precipitación interceptada por *Cistus ladanifer* (15,7% de la precipitación bruta) es inferior a la obtenida por Belmonte Serrato y Romero Diaz (1998) en tres arbustos del matorral mediterráneo semiárido, *Thymus vulgaris* (28,1%), *Rosmarinus officianles* (26,1%) y *Juniperus oxycedrus* (28,8%), y similar a los valores registrados por Zhang et al. (2015) en 10 individuos de *Caragana korshinskii* (16,7%) y 7 de *Artemisa ordosica* (22,3%) en el desierto de Tengger (China).

4.1.3. Medidas de escorrentía cortical

Han sido muy pocos los episodios de lluvia en los que no se han podido registrar la escorrentía cortical en los pinos, por lo que se dispone de un gran número de medidas en estos cinco años, un total de 101 en “P_{M1}” y de 102 en “P_{M2}”. El volumen de escorrentía cortical recogido en el ejemplar “P_{M2}” durante todo el periodo de estudio fue de 7,6 mm, mientras que en el individuo “P_{M1}” fue de 6,2 mm, lo que representa sólo el 0,3% y 0,2% de la precipitación bruta respectivamente, dándose una correlación positiva y alta ($R^2 > 0,75$) entre la escorrentía cortical y la precipitación (figura 4.1.4a). En ambos casos, el máximo escurrimiento relativo por el tronco en un episodio fue del 0,7% de la precipitación bruta.

Igualmente, de las 79 medidas realizadas de escorrentía cortical en *Cistus ladanifer*, se obtiene una fuerte correlación entre esta variable y la precipitación bruta

4. Resultados y discusión

($R^2=0,93$), tal como se observa en la figura 4.1.4b. En esta especie, el volumen recogido representa el 16,7% del total de las lluvias, valor muy superior al obtenido en *Pinus pinea*, llegando a ser el máximo escurrimiento fustal relativo observado en un episodio el 26,4%.

La escorrentía cortical es insignificante en *Pinus pinea*, mientras que 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, y a su forma característica, propia de plantas autóctonas plenamente adaptadas a este clima, que dirige hacia el pie del tronco todo el agua recogida.

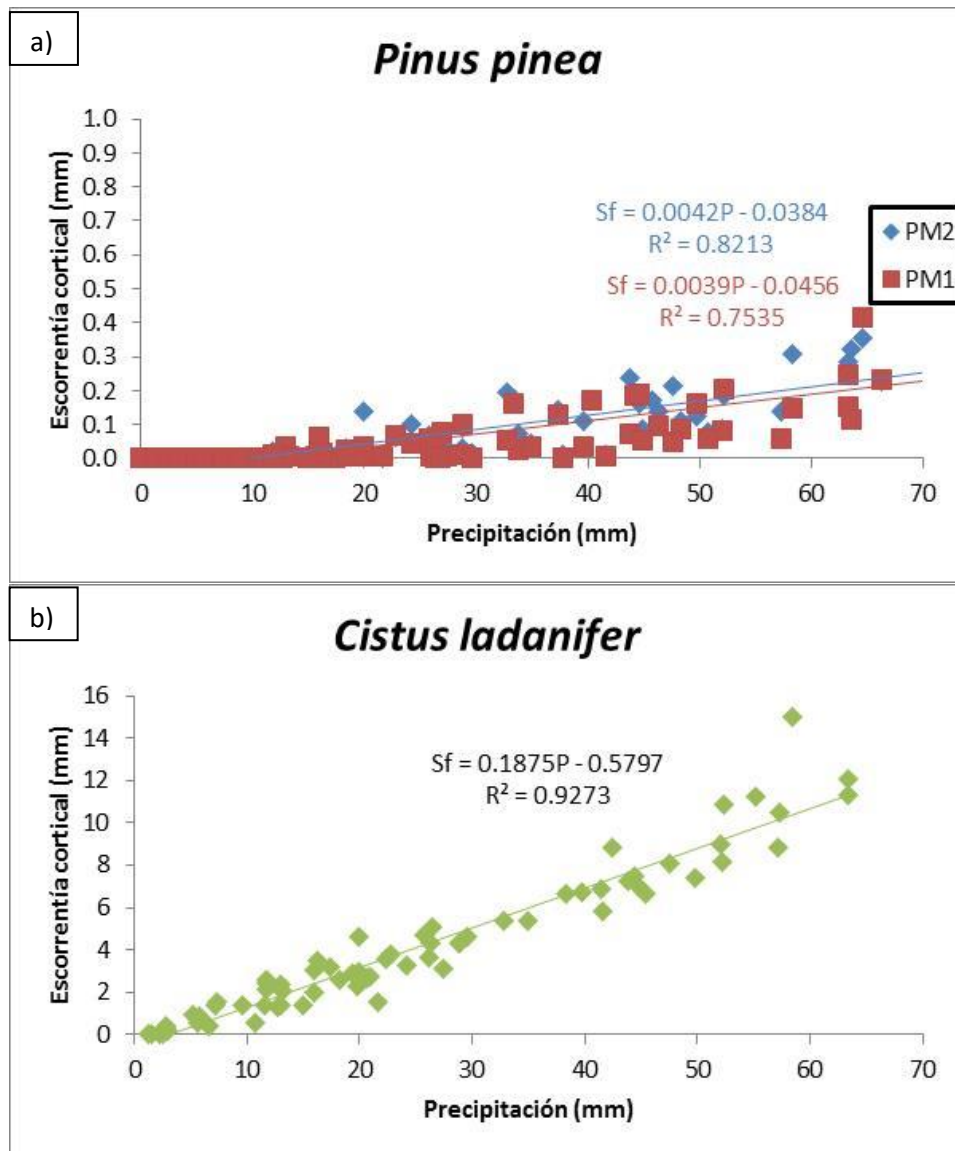


Figura 4.1.4. Relación entre las medidas de escorrentía cortical y la precipitación en *Pinus pinea* (a) y *Cistus ladanifer* (b).

El porcentaje de escorrentía cortical medio obtenido en *Cistus ladanifer* (16,7% 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 su geometría característica en forma de embudo ya comentada, y a la disposición particular de sus ramas que, al estar orientadas verticalmente con una inserción mayor a 45° medidos sobre la horizontal, favorecen el flujo de agua de las ramas hacia el tronco (Delphis et al., 2003). Este valor es muy superior al 5,6% obtenido para esta misma especie por García Estríngana (2011). 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.

Estudios realizados en el clima mediterráneo, revelan que la vegetación arbustiva alcanza intensidades de escorrentía cortical entre 4.4% y 42.5%, y la vegetación arbórea entre 0.3% y 20.4% (Llorens y Domingo, 2007). Por ejemplo, Bellot y Escarre (1991) estimaron 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*. Llorens et al. (1997) obtuvieron también valores muy bajos de escorrentía cortical en *Pinus sylvestris*, entre 0.5% y 2% de la precipitación total incidente.

Estos datos evidencian de nuevo la importancia de la estructura de las plantas en el balance hídrico, ya que este flujo está relacionado con la arquitectura de las mismas, principalmente con el ángulo de inserción de las ramas (Moreno-Pérez et al., 2012). Mientras más agudos sean los ángulos de inserción de las ramas y hojas, y más lisas sean las cortezas, tendrá lugar un mayor flujo cortical (García Estríngana, 2011).

4.1.4. Medidas de trascolación

En ambos individuos de pino existe una correlación lineal fuerte y positiva entre trascolación y precipitación bruta, tal como se observa en la figura 4.1.5a. La trascolación total en “P_{M2}” fue de 1786,9 mm, lo que representa 71,1% de la precipitación bruta total. Desde Octubre de 2013, el volumen de trascolación en el árbol “P_{M1}” ha sido de 534,7 mm, el 69,1% de la precipitación acontecida en ese periodo. En el caso de la jara (figura 4.1.5b), también existe una alta correlación entre la trascolación y la precipitación bruta ($Tr=0.74P-1.36$, $R^2=0.965$, $n=66$).

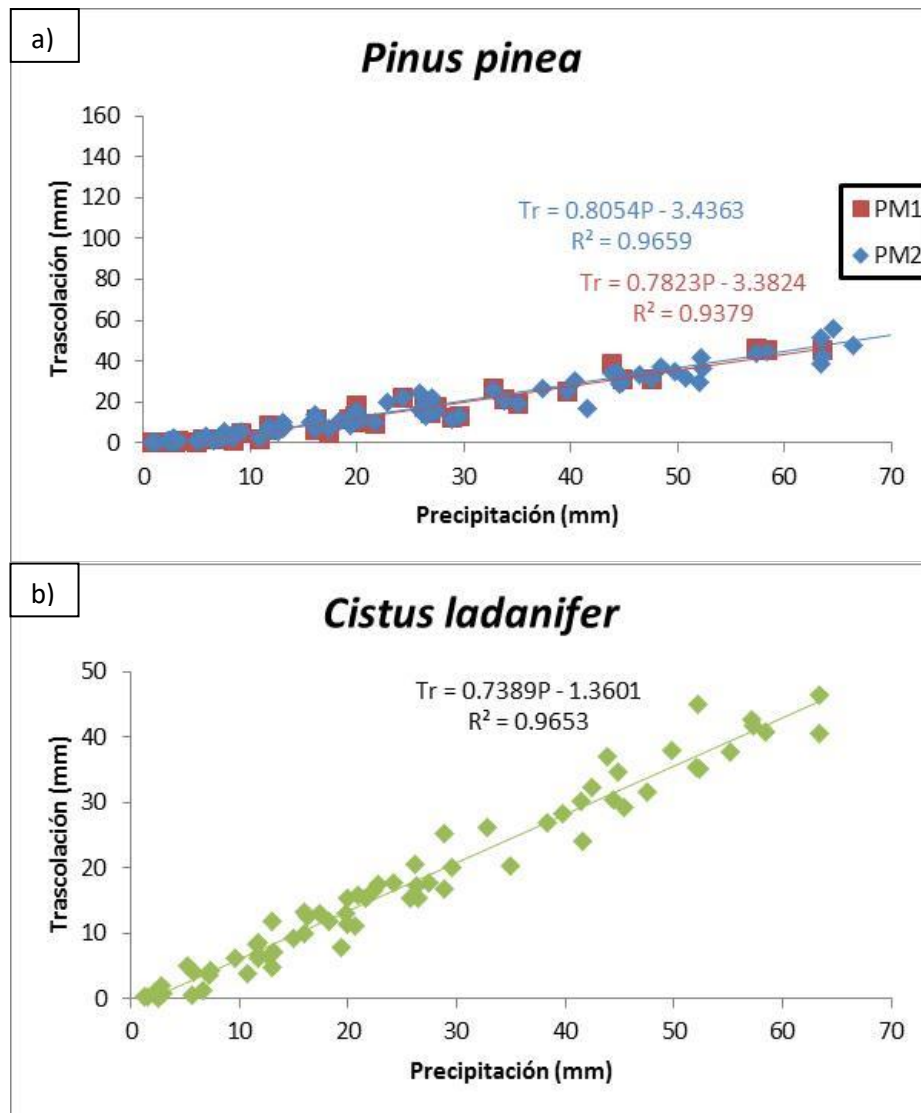


Figura 4.1.5. Relación entre las medidas de trascolación y la precipitación en *Pinus pinea* (a) y *Cistus ladanifer* (b).

El porcentaje de trascolación en *Cistus ladanifer* ha sido del 67,5%, valor ligeramente inferior al obtenido por Simões et al. (2009) que, en su estudio llevado a cabo en el sur de Portugal durante dos años, registró un valor de trascolación del 79% en la misma especie y del 61% en *Cistus salviifolius*.

4.1.5. Relación entre diferentes características de la lluvia y la interceptación

En la figura 4.1.6 se muestran los porcentajes de trascolación, escorrentía cortical e interceptación, que se obtienen en las parcelas de estudio de pino y jara, tomando bloques de precipitación de 10 mm.

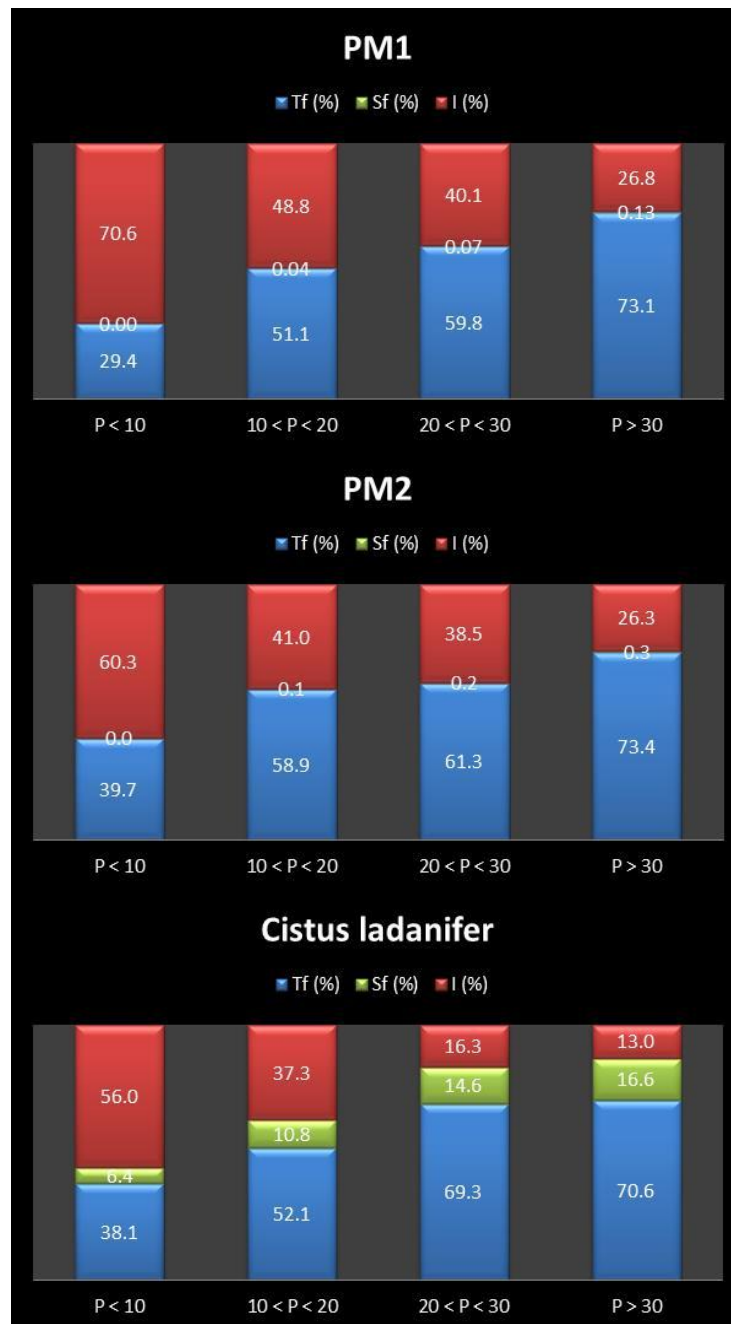


Figura 4.1.6. Media de los porcentajes de trascolación, escorrentía cortical e interceptación para cuatro clases de lluvia bruta durante el período de octubre de 2010 a julio de 2015 en *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

Al igual que encontraron Llorens y Domingo (2007), los resultados obtenidos confirman que la cantidad de lluvia tiene un gran impacto en la redistribución de *I*, *Tr* y *S_f*. A mayor cantidad de precipitación, aumenta la trascolación y la escorrentía cortical, disminuyendo el porcentaje de interceptación. Una característica importante del proceso de interceptación es que una tormenta puede saturar el dosel muy rápidamente si su capacidad de retención de agua es baja. Pequeñas lloviznas tienden a producir una

4. Resultados y discusión

mayor pérdida de interceptación, dado que las primeras gotas de lluvia se ocupan en gran medida de la humectación de la superficie de las copas, disminuyendo la cantidad de agua que alcanza el suelo, ya que son almacenadas por el dosel de la planta, no produciéndose más trascolación que la precipitación que atraviesa el dosel sin ser interceptada (trascolación libre). A medida que el dosel de la planta se va saturando y no puede almacenar más agua, comienza a caer agua procedente del mismo, disminuyendo el porcentaje de interceptación (Zeng et al., 2000;.Moreno-Perez et al., 2013).

El efecto que ejerce la duración y la intensidad de las precipitaciones sobre los porcentajes de interceptación se muestran en la figura 4.1.7. Los episodios se clasificaron en dos intervalos de intensidad, entre 0,2-2 mm/h y mayores a 2 mm/h, y se ajustaron diversas formas de ecuaciones, encontrándose que la forma semilogarítmica producía resultados más satisfactorios que una relación linear, un hecho ya comprobado por otros investigadores (Schulze et al., 1978).

En ambas especies, con precipitaciones de intensidad entre 0,2-2 mm/h y de poca duración, la interceptación de la lluvia retenida por el dosel alcanza valores superiores al 80%. A medida que la duración de las lluvias aumenta, comienzan a saturarse completamente las plantas y el porcentaje de agua retenida en relación a la cantidad de precipitaciones va decreciendo, llegando a valores inferiores al 40 % cuando la duración supera las 10 horas.

En nuestro caso, aunque los valores de R^2 obtenidos son bajos, las tendencias están muy claras, a medida que aumenta la duración y la intensidad de las precipitaciones disminuye porcentualmente la importancia de la interceptación. Con precipitaciones de intensidad entre 0,2-2 mm/h y de poca duración, la interceptación de la lluvia retenida por el dosel de ambas especies alcanza valores superiores al 80%. A medida que la duración de las lluvias aumenta, comienzan a saturarse completamente las plantas y el porcentaje de agua retenida en relación a la cantidad de precipitaciones va decreciendo, llegando por ejemplo en el caso de la jara a valores inferiores al 40 % cuando la duración supera las 10 horas, independientemente de la intensidad de lluvia.

Aunque la interceptación es diferente según la intensidad de cada lluvia, no se ha alcanzado consenso sobre el efecto de la intensidad de la lluvia sobre la interceptación. Algunos estudios sugieren que la interceptación aumenta al incrementarse la intensidad de la lluvia debido a la saturación gradual de la corona (Aston, 1979; Keim et al., 2006),

mientras que otros estudios indican que las mayores intensidades de lluvia dan como resultado una interceptación más baja debido a que las gotas de agua no se pueden almacenar en las hojas y las ramas, mientras que el dosel está siendo agitado por las lluvias intensas (Horton, 1919; Wang et al., 2007).

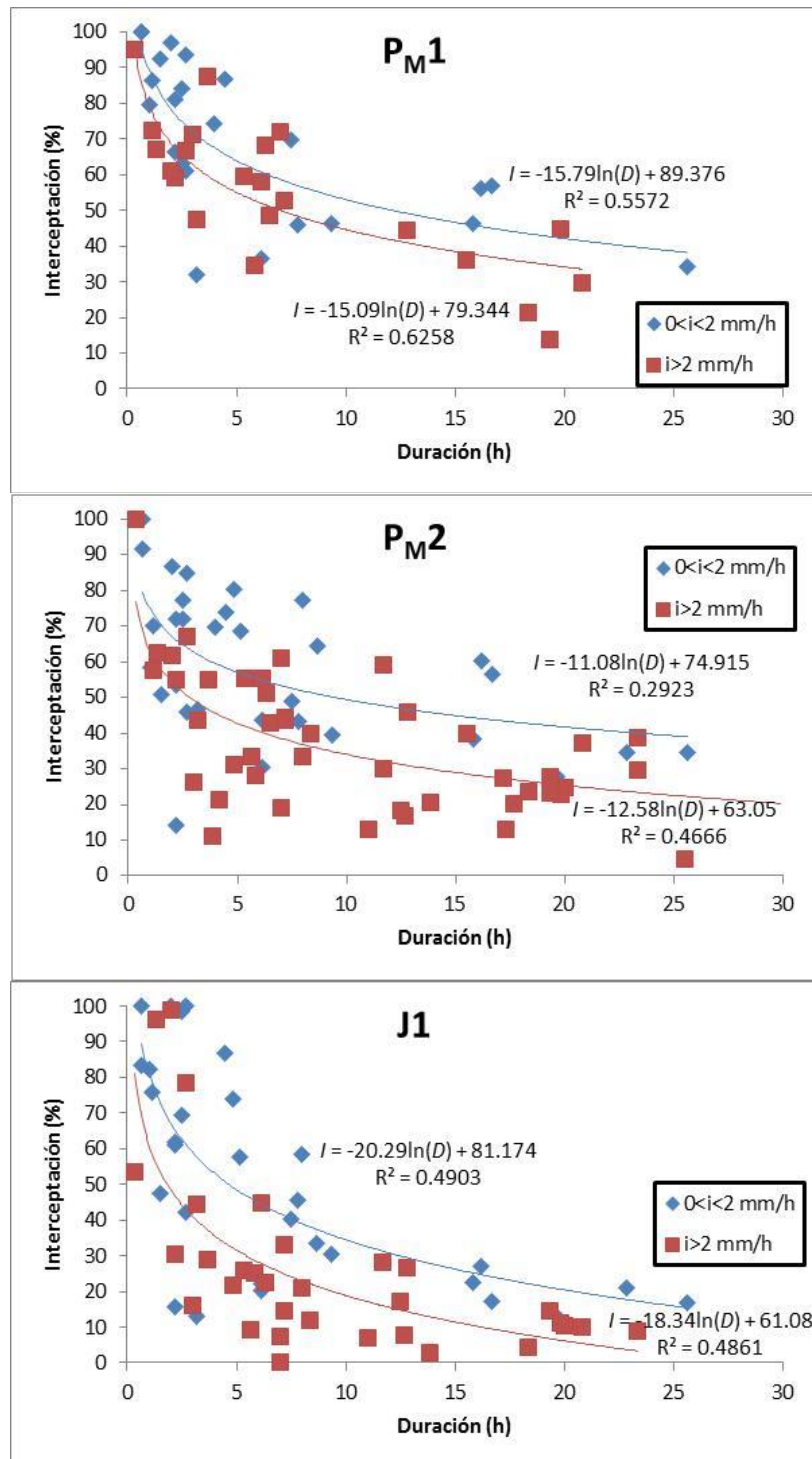


Figura 4.1.7. Relaciones entre la interceptación (%) y duración de las precipitaciones (h) para diferentes intervalos de intensidad de las lluvias en *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

4. Resultados y discusión

En la figura 4.1.8 se presenta la influencia que tiene la cantidad e intensidad de las precipitaciones en la cantidad de agua interceptada por los individuos de *Pinus pinea* a partir de los datos de precipitación recogidos con los pluviómetros automáticos. Se observa como con precipitaciones inferiores a 2 mm, independientemente de su intensidad, prácticamente toda la lluvia es retenida por el dosel hasta que se satura de agua. La cantidad de precipitación necesaria para se alcance la saturación del dosel depende principalmente del tipo y estructura de la planta y, por lo tanto, puede variar considerablemente de una a otra. Una vez que las precipitaciones aumentan y se ha saturado el dosel de las plantas, la cantidad de intercepción se diferencia según la intensidad de cada lluvia, existiendo una correlación significativa entre la cantidad e intensidad de las precipitaciones y la intercepción.

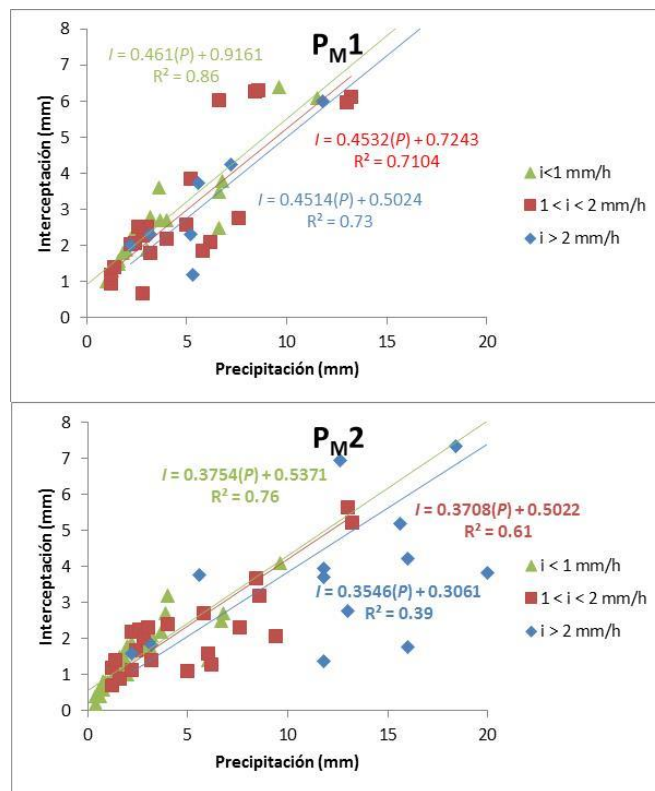


Figura 4.1.8. Relaciones entre la intercepción (mm) y cantidad de precipitación (mm) para diferentes intervalos de intensidad de las lluvias en *Pinus pinea*.

También se puede observar que la cantidad de agua necesaria para saturar las copas es de 0,92; 0,72 y 0,5 mm en P_{M1} y de 0,54; 0,5 y 0,3 en P_{M2} para los rangos de intensidades de lluvia entre 0-1; 1-2 y mayores de 2 mm/h, respectivamente. Las diferencias observadas entre ambos pinos, de estructura aparentemente similar, son concordantes con el hecho de que el PM2 tiene un mayor coeficiente de trascolación libre (ver apartado 4.3.1).

En nuestro caso, los resultados muestran que para eventos de precipitación de igual magnitud, la cantidad de agua interceptada por los árboles va decreciendo proporcionalmente a medida que aumenta la intensidad de las lluvias. Este efecto de la intensidad de lluvia sobre la interceptación se debe a que cuando la intensidad es alta, el agua de lluvia adherida a las acículas es sacudida de ellas, por lo que tiene un menor tiempo de permanencia en el dosel y, por lo tanto, un menor tiempo potencial para evaporar (Huber y Oyarzún, 1984).

Las mayores intensidades de interceptación se registraron durante los eventos de precipitación con intensidad entre 0-1 mm/h y, como era de esperar, las pérdidas por interceptación aumentan a medida que se incrementa la cantidad de lluvia. Generalmente durante un evento de precipitación con poca intensidad, el agua de lluvia retenida por el dosel está expuesta a un mayor tiempo de exposición para una potencial evaporación, aumentando en estos casos por tanto las pérdidas por interceptación.

4.1.6. Relación entre diferentes variables climáticas y la interceptación

Para estudiar la influencia del clima sobre la interceptación, se analizaron los efectos de seis variables meteorológicas que, como se ha dicho, ya han sido consideradas en la literatura: cantidad (P), intensidad (i) y duración (D) de la precipitación, temperatura (T) y velocidad (V) y dirección (d) del viento.

A pesar de que todos los cálculos se llevan a cabo de forma independiente para cada uno de los ejemplares analizados, los resultados finales mostrados en este apartado se refieren a los individuos de cada especie en su conjunto, de manera que en el caso del pino, se incluyen los episodios de lluvia que tienen lugar desde Octubre de 2010 hasta Junio de 2015 en P_{M2} y desde Octubre de 2013 hasta Junio de 2015 en P_{M1} , y en el caso de la jara, se incluyen los episodios de lluvia que tienen lugar desde Octubre de 2010 hasta Enero de 2015 en $J1$ y desde Febrero de 2015 hasta Junio de 2015 en $J2$.

Centrando el estudio en las características de la precipitación, se tiene que en ambas especies disminuye la capacidad de interceptación, o porcentaje de interceptación sobre la precipitación bruta, al aumentar la cantidad, la intensidad y la duración de la lluvia que cae en cada episodio, mientras que, por el contrario, la trascolación va en aumento. La escorrentía cortical también es mayor conforme estas variables aumentan (figura 4.1.9).

4. Resultados y discusión

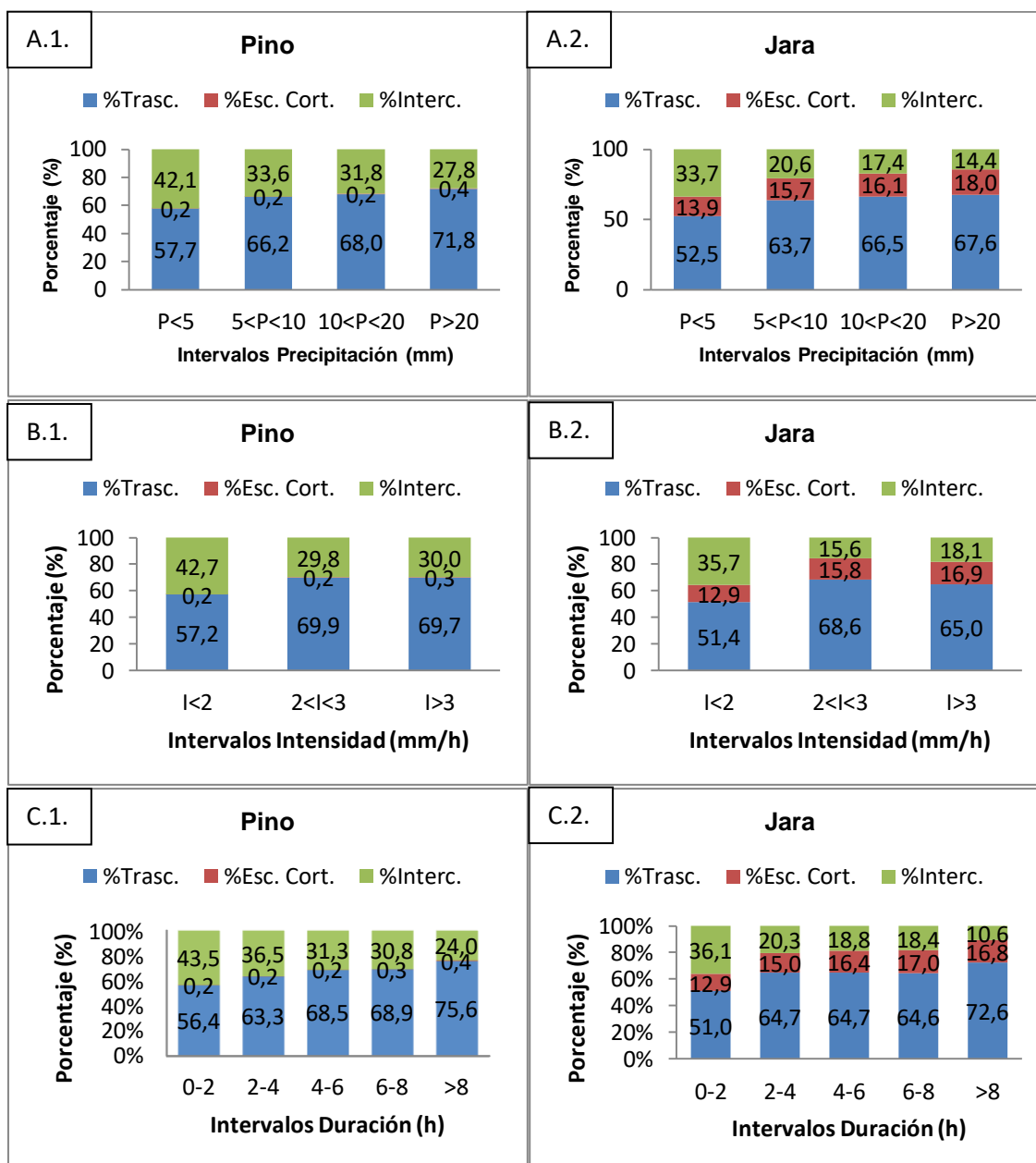


Figura 4.1.9. Porcentaje de trascolación, escorrentía cortical e interceptación en función de la cantidad (A), intensidad (B) y duración (C) de las precipitaciones en *Pinus pinea* (1) y *Cistus ladanifer* (2).

Respecto a las otras características climáticas consideradas en el estudio, se tiene que la capacidad de interceptación de ambas coberturas disminuye con el aumento de la temperatura a la que tiene lugar el episodio de lluvia (figura 4.1.10). El viento también influye de forma apreciable, de tal forma que el porcentaje de precipitación interceptada es mayor cuando apenas hay viento (velocidades inferiores a 1 m/s) y disminuye cuando sigue la dirección Sur, que es la dirección del viento predominante, seguida del Sureste (figura 4.1.11).

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

En general, se observa que un aumento de la velocidad del viento disminuye los porcentajes de interceptación, debido principalmente a que el viento sacude el dosel de los árboles y las plantas disminuyendo con ello la cantidad máxima de agua que pueden retener (Pérez Arellano et al., 2014).

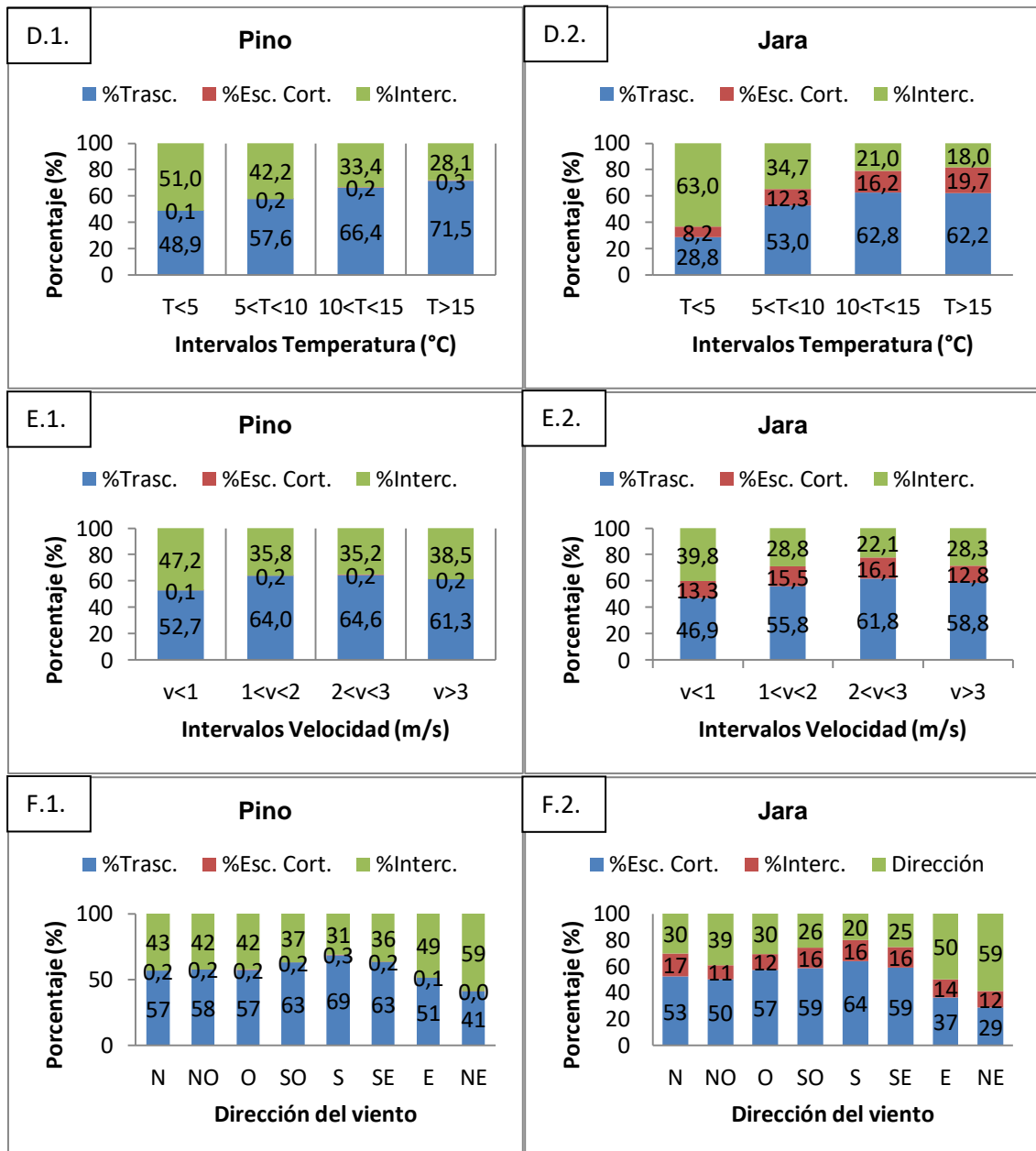


Figura 4.1.10. Porcentaje de trascolación, escorrentía cortical e interceptación en función de la temperatura (D), velocidad (E) y dirección (F) del viento en *Pinus pinea* (1) y *Cistus ladanifer* (2).

Para determinar cuál de estas variables climáticas ejerce una mayor influencia sobre la interceptación en estas especies, se ha realizado un análisis de regresión múltiple. A diferencia del simple, el análisis de regresión lineal múltiple se aproxima

4. Resultados y discusión

más a situaciones de análisis real puesto que este tipo de procesos, por definición, son complejos y, en consecuencia, deben ser explicados en la medida de lo posible por una serie de variables que, directa e indirectamente, participan en su concreción (Rodríguez y Morar, 2002).

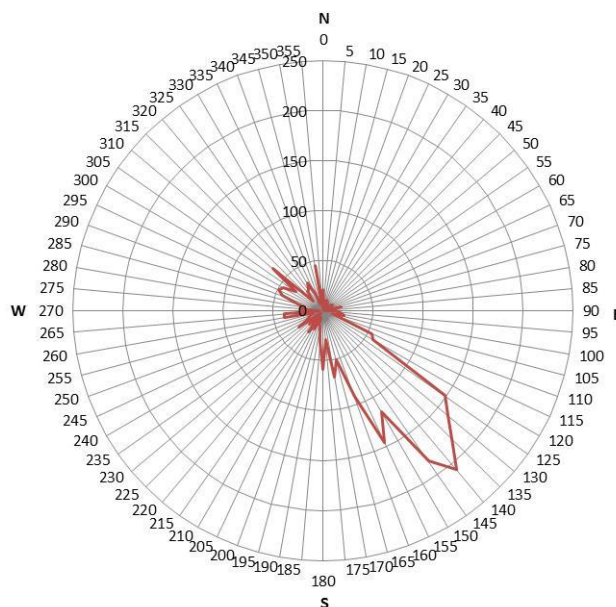


Figura 4.1.11. Cantidad de precipitación según la dirección del viento durante el período de estudio.

Inicialmente se hizo un análisis de correlación simple usando el programa Statistix 10 (Analytical Software, 2013). Una vez introducidos los datos experimentales, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.1.4.

Tabla 4.1.4. Coeficientes de correlación lineal

		<i>I-P</i>	<i>I-i</i>	<i>I-D</i>	<i>I-V</i>	<i>I-T</i>
<i>Pinus pinea</i>	Coef. Pearson (<i>r</i>)	0.83	0.60	0.79	0.05	0.16
	Determinación (R^2)	0.69	0.36	0.63	0.00	0.03
<i>Cistus ladanifer</i>	Coef. Pearson (<i>r</i>)	0.60	0.86	0.84	0.08	0.25
	Determinación (R^2)	0.36	0.73	0.71	0.01	0.06

En ambas especies, el coeficiente de correlación lineal de Pearson, *r*, ha resultado ser altamente significativo para las tres primeras variables estudiadas (cantidad, intensidad y duración de los episodios de precipitación) que están

relacionadas con la interceptación con un nivel de significación del 1%, ya que los valores de r en la tabla de probabilidad para el caso de *Pinus pinea* con 125 grados de libertad son $r=0.174$ para $p=0.05$ y $r=0.228$ para $p=0.01$, y para el caso de *Cistus ladanifer* con 80 grados de libertad son $r=0.217$ para $p=0.05$ y $r=0.283$ para $p=0.01$, en ambos casos inferiores al valor de r obtenido en las tres variables mencionadas (Fernández Escobar et al., 2010). A pesar de haberse obtenido un valor alto y significativo de r , no se puede interpretar que un cambio en una de las variables cause un cambio en la otra, pues el resto de variables no estudiadas pueden afectar al proceso, por lo que ha de realizarse un análisis de regresión múltiple.

El análisis de regresión lineal múltiple, usando los datos recogidos en *Pinus pinea*, entre la interceptación y todas las variables climáticas consideradas, nos produce la ecuación de regresión 4.1.1:

$$I = -0.8 + 0.04P + 1.01i + 0.01D - 0.11V - 0.03T \quad R^2 = 0.77 \quad (4.1.1)$$

Se realiza el mismo análisis de regresión múltiple con los datos recogidos en la jara, y se obtiene la ecuación completa de regresión (4.2):

$$I = 0.05 + 0.09P + 0.4i + 0.001D - 0.01V - 0.03T \quad R^2 = 0.76 \quad (4.1.2)$$

El coeficiente de determinación R^2 , o coeficiente de correlación múltiple al cuadrado, es una medida descriptiva que sirve para evaluar la bondad de ajuste del modelo a los datos, ya que mide la capacidad predictiva del modelo ajustado. Este coeficiente sería un buen criterio para seleccionar modelos, pero R^2 suele aumentar al aumentar el número de variables incluidas, aunque contribuyan poco, de forma que el R^2 mayor siempre corresponderá al modelo que incluya más variables.

El problema que se plantea es cómo elegir el conjunto de variables independientes que mejor expliquen la variabilidad de la interceptación, ya que todas no tienen el mismo peso, y puede ser que algunas incluso no influyan. Para ello se ha utilizado el programa Statistix 2010 (Analytical Software, 2013) que incluye dos procedimientos que permiten seleccionar los modelos más adecuados para el estudio de la regresión múltiple.

A partir de la regresión lineal múltiple, se realiza la primera estimación del modelo mediante el método denominado Backward Stepwise Regression (BSR) que nos

conducirá a una simplificación de la ecuación anterior dejando solo aquellas variables independientes de mayor influencia sobre la interceptación (Llopis, 1996).

La columna de la derecha de las tablas 4.1.5 y 4.1.6 indica los posibles modelos que pueden elaborarse con las variables introducidas. En las restantes columnas se muestra el número de parámetros que se incluyen en el modelo, el estadístico C_p de Mallows, los valores del R^2 ajustado (R^2_a), los valores de $AICc$ (Criterio de Información de Akaike) de los modelos candidatos y la suma de cuadrados de los residuales (SCE) para cada modelo.

El estadístico C_p se utiliza para evaluar el ajuste del modelo de regresión que se ha estimado usando mínimos cuadrados ordinarios y permite eliminar variables que contribuyen poco al modelo, siendo los mejores modelos los que presentan un valor de C_p cercano o menor que el número de parámetros en el modelo. El coeficiente de determinación ajustado o corregido por grados de libertad R^2_a , se define como una alternativa al uso de R^2 como medida de la idoneidad de un modelo. Este coeficiente tiene en cuenta tanto el tamaño de la muestra como el número de parámetros del modelo. R^2_a sólo disminuye al introducir una nueva variable explicativa en el modelo, si la varianza residual disminuye (Montgomery et al., 2002).

La suma de cuadrados de los residuos, también llamada la suma de cuadrados del error (SCE), es una medida del ajuste del modelo. En general, cuanto mejor es el ajuste, más pequeño es este error. $AICc_{min}$ se puede interpretar como la probabilidad relativa de que el modelo minimice la pérdida de información, estableciendo un equilibrio entre el número de parámetros requerido y la máxima función de verosimilitud obtenida al realizar el ajuste (Akaike, 1974).

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 4.1.5. Regresión lineal múltiple obtenida por el método BSR en *Pinus pinea*

Modelo BSR para INTERCEPTACIÓN					
Variables independientes: (A)P (B)i (C)T (D)V (E)D					
Parámetros	Cp	R ² ajustado	AICc - Min AICc	SCE	Variables
1	571,4	0,0000	486,11	2896,63	Interceptación
2	64,7	0,6862	290,16	903,704	A
2	106,8	0,6288	318,69	1068,83	E
2	308,1	0,3549	412,64	1857,47	B
3	5,0	0,7687	239,35	661,979	B E
3	37,7	0,7240	269,42	790,068	A B
3	55,3	0,6998	283,70	859,317	A E
4	3,5	0,7721	237,95	648,397	A B E
4	5,5	0,7693	240,03	656,391	B D E
4	6,5	0,7680	241,00	660,154	B C E
5	4,4	0,7722	238,99	644,179	A B D E
5	4,9	0,7715	239,49	646,097	A B C E
5	7,2	0,7683	241,86	655,165	B C D E
6	6,0	0,7714	240,72	642,494	A B C D E

Número de episodios 124

Tabla 4.1.6. Regresión lineal múltiple obtenida por el método BSR en *Cistus ladanifer*

Modelo BSR para INTERCEPTACIÓN					
Variables independientes: (A)P (B)i (C)T (D)V (E)D					
Parámetros	Cp	R ² ajustado	AICc - Min AICc	SCE	Variables
1	412,5	0,0000	185,66	366,252	Inter
2	30,4	0,7058	25,27	106,947	A
2	158,9	0,4671	103,66	193,687	B
2	173,1	0,4408	110,03	203,254	E
3	4,2	0,7563	1,52	87,9093	A B
3	25,4	0,7166	21,4	102,198	B E
3	26,5	0,7145	22,37	102,954	A E
4	2,6	0,7611	0	85,4919	A B C
4	5,5	0,7557	2,96	87,4335	A B E
4	6,1	0,7546	3,56	87,8258	A B D
5	4,0	0,7604	1,55	85,0776	A B C E
5	4,6	0,7592	2,19	85,4895	A B C D
5	7,3	0,7541	4,98	87,314	A B D E
6	6,0	0,7585	3,77	85,0665	A B C D E

Número de episodios 77

El modelo elegido en el caso de *Pinus pinea* es el que incluye precipitación, intensidad y duración como variables independientes, ya que es el que tiene menor valor del estadístico C_p . Además el R^2 ajustado es el segundo mayor y tiene el menor coeficiente considerando el $AICc$ min. La regresión múltiple obtenida con estas tres variables independientes se muestra en la ecuación 4.1.3.

$$I = -1.26 + 0.04P + 0.96i + 0.01D \quad R^2 = 0.77 \quad (4.1.3)$$

En la jara, el R^2 ajustado mayor corresponde al modelo que incluye precipitación, intensidad y temperatura como variables independientes. Si se utilizan los estadísticos C_p y $AICc$ min se llega a la misma conclusión, pues esa combinación de variables aporta sus valores mínimos ($C_p=2.6$; $AICc$ min=0). Tomando las variables

4. Resultados y discusión

propuestas por el procedimiento BSR, obtenemos la ecuación 4.1.4 de regresión para la jara.

$$I = 0.13 + 0.1P + 0.36i - 0.04T \quad R^2 = 0.76 \quad (4.1.4)$$

Del valor de los coeficientes se deduce que en ambos casos la variable intensidad de lluvia es la que ejerce una mayor influencia en la capacidad de interceptación.

El segundo procedimiento es el denominado Stepwise Linear Regression (SLR), que resulta de particular utilidad cuando el número de variables independientes a estudiar es alto (Draper y Smith, 1981).

Las tablas 4.1.7 y 4.1.8 muestran al principio los valores de R^2 , del error cuadrático medio (ECM) y la significación (p) para cada uno de los modelos con las variables introducidas. A continuación, muestra el análisis de la regresión múltiple con dos variables para el mejor modelo seleccionado por el procedimiento. Al final incluye las variables no consideradas con los coeficientes de correlación múltiple y parcial de cada una de ellas, el valor de t de Student (T) y la significación (p).

Tabla 4.1.7. Regresión linear múltiple obtenida por el método SLR en *Pinus pinea*

Modelo SLR para INTERCEPTACIÓN					
Modelo	R ²	ECM	P	D	P I T V
1	0,0000	171,398	
2	0,6880	537,919	0,00	.	B
3	0,7272	473,094	0,00	.	B C . . .
4	0,7762	390,601	0,00	A	B C . . .
5	0,7715	396,395	0,064	A	. C . . .
Modelo elegido					
Variable	Coefficiente	Error Std	T	P	
Constante	-1,56859	0,27344	-5,74	0,0000	
DURACION (A)	8.98E+00	5.17E-01	17,37	0,0000	
INTENSIDAD (C)	1,09685	0,10827	10,13	0,0000	
Número de episodios	124	R ²	0,7715	ECM	396,395
		R ² ajustado	0,7687	Desv.Std	199,097
Variables No incluidas					
	Correlaciones				
Variables	Múltiple	Parcial	T	P	
PRECIPITACION (B)	0,9265	0,1432	1,86	0,0640	
TEMPERATURA	0,3178	-0,0525	-0,68	0,4990	
VELOCIDAD	0,2250	-0,0919	-1,19	0,2362	

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 4.1.8. Regresión lineal múltiple obtenida por el método SLR en *Cistus ladanifer*

Modelo SLR para INTERCEPTACIÓN					
Modelo	R²	ECM	P	D	P I T V
1	0,0000	2.79581
2	0,7080	0.82267	0,0000	.	B
3	0,7600	0.68147	0,0000	.	B C . .
Modelo elegido					
Variable	Coficiente	Error Std	T	P	
Constante	-0.19107	0.12705	-1,50	0,1350	
PRECIPITACION (B)	0.10261	0.00824	12,46	0,0000	
INTENSIDAD (C)	0.33175	0.06277	5,29	0,0000	
Número de episodios	77	R ²	0,7600	ECM	0.68147
		R ² ajustado	0,7563	Desv. Std	0.82551
Variables No incluidas					
	Correlaciones				
Variables	Multiple	Parcial	T	P	
DURACION	0,9085	0,0736	0,83	0,4055	
TEMPERATURA	0,3295	-0,1658	-1,90	0,0594	
VELOCIDAD	0,2048	-0,0308	-0,35	0,7278	

Este segundo método propone ecuaciones con dos variables independientes con prácticamente el mismo valor de R^2 que el obtenido para tres variables. Nuevamente en estas ecuaciones queda patente que la variable independiente intensidad de lluvia es la que tiene mayor peso y, por tanto, la que provoca una mayor variación en la interceptación, teniendo más influencia en el caso del pino (Pérez Arellano et al., 2015d).

4.1.7. Variabilidad anual y estacional de la interceptación

Como se ha dicho (ver apartado 4.1.2), de los años de estudio, dos fueron lluviosos (2010-2011 y 2012-2013) y los otros tres bastante secos, siendo el promedio de las pérdidas de interceptación durante todo el periodo de estudio superior al 30.5% en los ejemplares de *Pinus pinea* y de 17.7% para *Cistus ladanifer*. Sin embargo, existe una gran variabilidad entre años secos y húmedos. Los valores de interceptación de *Pinus pinea* varían de media entre el 24% en años lluviosos y el 37.5% en los años secos. Un comportamiento similar se produce en *Cistus ladanifer*, donde la interceptación tiene un valor medio del 12% en años húmedos y del 22% en los años secos. El aumento del porcentaje de interceptación en los años secos viene determinado por un brusco descenso del volumen de precipitación, que provoca que una gran parte de la precipitación quede almacenada en la cubierta desde donde es devuelta a la atmósfera tras la lluvia (Francisco Belmonte Serrato, 1997). Esto se debe al hecho de que en los años lluviosos la capacidad de almacenamiento del dosel (S) se supera más

4. Resultados y discusión

fácilmente, tal como muestran los resultados de la tabla 4.1.9. El cálculo de S se realiza a partir de la representación gráfica de la precipitación bruta (P) de los eventos de lluvia suficientemente grandes para saturar el dosel, bien frente a la interceptación correspondiente tal como sugiere la metodología propuesta por Klaassen et al. (1998), bien frente la trascolación, siguiendo la metodología de Gerrits (2010). Los resultados obtenidos tras realizar el análisis muestran que en ambas especies tiene lugar un aumento del valor de la capacidad de almacenamiento en los años secos respecto los años lluviosos (Pérez Arellano et al., 2015b).

Tabla 4.1.9. Variabilidad anual de la capacidad de interceptación y de almacenamiento entre años secos (naranja) y años lluviosos (azul)

	P_{anual} (mm)	I_{pinus} (%)	I_{cistus} (%)	S_{pinus} (mm)	S_{cistus} (mm)
2010-2011	805.7	21.8	7	0.39	0.1
2011-2012	283.5	38.3	23.8	1.77	0.68
2012-2013	635.1	26.1	15.6	0.83	0.39
2013-2014	402.4	42.4(P_{M1}) 43.0(P_{M2})	18.5	1.39	0.57
2014-2015	449.4	32.8 (P_{M1}) 34.5 (P_{M2})	22.7	2.71	0.75

Por otra parte, al analizar los resultados en diferentes escalas de tiempo, se ha observado que la interceptación del dosel no sólo difiere con el tipo de vegetación y la precipitación anual, sino también entre las estaciones del año (figura 4.1.12).

Durante el otoño, las pérdidas de interceptación son más bajas que en otras estaciones (24.2 % en pino y 13.2% en jara), lo que se puede explicar, no sólo porque la vegetación ha perdido sus hojas, sino porque en esta estación del año se concentra la mayor parte del volumen de precipitación anual (casi el 50%). En invierno las pérdidas por interceptación son más altas que en otoño (32.4% en pino y 17.4% en jara) debido a una disminución de las precipitaciones y a que, además, las intensidades de las mismas son más bajas (sólo el 8% de los eventos de precipitación tienen una intensidad mayor que 3 mm/h, y no hay ningún evento con una intensidad mayor a 5 mm/h), mientras que en la primavera se producen las mayores pérdidas por interceptación (37.2 % en pino y 24.1% en jara), ya que, aunque los eventos de lluvia tienen una intensidad más alta (25% de los eventos con una intensidad superior a 3 mm/h), prevalece el crecimiento de la vegetación que tiene lugar en esta estación, además de que la cantidad de lluvia es menor que en otoño. Durante el verano no se producen precipitaciones considerables para nuestro estudio.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

En la tabla 4.1.10 aparecen los diferentes valores de la capacidad de almacenamiento encontrados en las distintas estaciones del año. Se observa como la evolución del valor de este parámetro sigue un comportamiento similar en ambas especie: valores más altos en otoño, que disminuyen en invierno y lo hacen más aun en primavera, por las mismas razones que se acaban de explicar para la variación estacional de la interceptación.

Tabla 4.1.10. Variabilidad estacional de la capacidad de almacenamiento del dosel en *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*

	Otoño	Invierno	Primavera
S_{pinus} (mm)	2.18	1.23	0.61
S_{cistus} (mm)	1.32	1.26	0.97

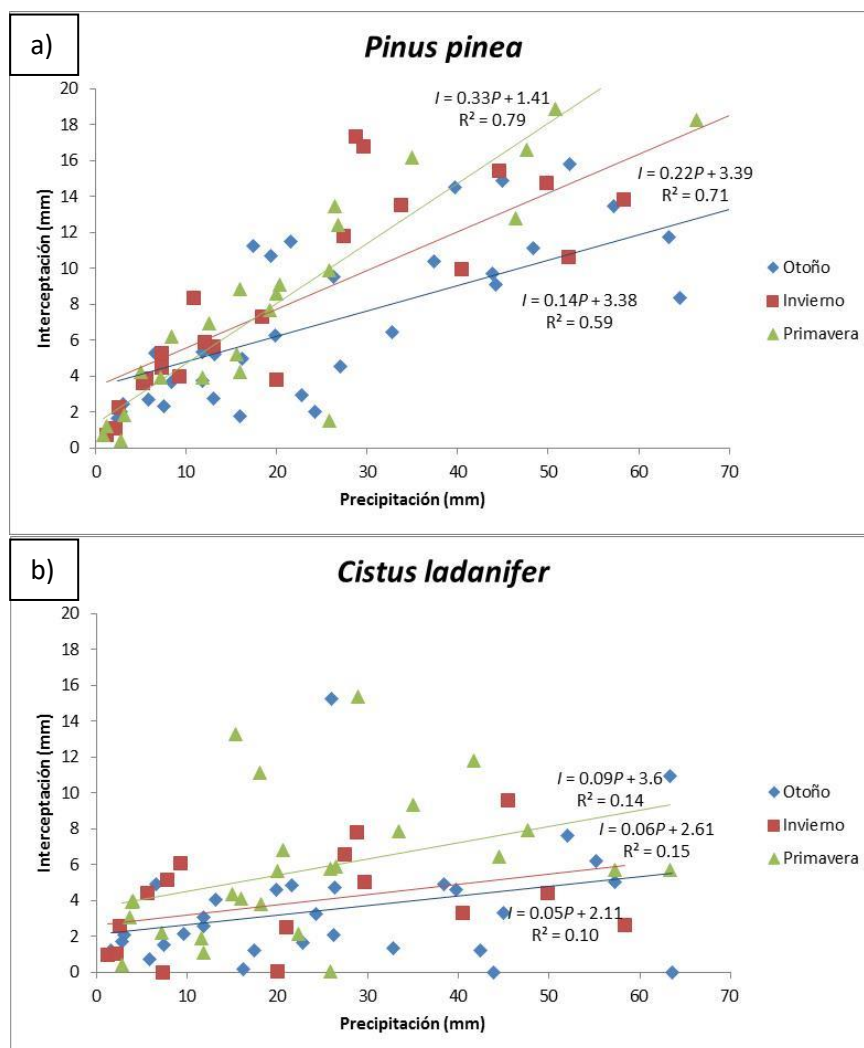


Figura 4.1.12. Relación entre Interceptación (mm) y Precipitación (mm) en *Pinus pinea* (a) y *Cistus ladanifer* (b) en cada estación del año.

4. Resultados y discusión

En el caso de *Cistus ladanifer*, se observa una gran variación de los valores de interceptación y una baja correlación entre valores de I y P ($R^2=0.14$, $n=29$; $R^2=0.15$, $n=15$; $R^2=0.1$, $n=26$; para otoño, invierno y primavera, respectivamente), aunque las tendencias de las rectas siguen el mismo patrón que se ha obtenido en *Pinus pinea*, es decir, para una misma cantidad de precipitación, la jara intercepta una mayor cantidad en primavera, seguido del invierno y del otoño, estación en la que la planta intercepta menos agua de lluvia.

Las pérdidas de agua por interceptación en *Cistus ladanifer* se muestran más constantes y menos dependientes de la cantidad de precipitación que en *Pinus pinea*. Sin embargo, y como se ha visto, la interceptación que tiene lugar en cada evento de precipitación depende principalmente de la intensidad de lluvia (i) de cada evento, de ahí los bajos valores de R^2 obtenidos.

4.2. Influencia de las características de la vegetación sobre la interceptación

4.2.1. Parámetros de influencia sobre los componentes de partición de la lluvia.

Para la identificación de las propiedades de la copa que influyen en la partición de la lluvia se debe llevar a cabo un estudio de las relaciones existentes entre la trascolación, la escorrentía cortical y la interceptación, con las características dasométricas de la copa mediante su representación gráfica y análisis de correlación. Posteriormente, se seleccionarán como variables predictoras de la partición de la lluvia aquellos atributos que concluyan un alto grado de correlación y se determinará el tipo de relación existente, con el fin de poder predecir los volúmenes de partición a partir de atributos de la copa y de la precipitación.

Entre las características dasométricas que se seleccionaron para la caracterización morfológica de los individuos (apartado 3.4.1 del anterior capítulo), se han escogido para el análisis de correlación las siguientes:

- ***Variables directas***

Altura del árbol ($h_{\text{árbol}}$)

Altura del fuste (h_{fuste})

Altura de la copa (h_{copa})

Diámetro a la altura del pecho (DBH).

Área de proyección de la copa (A_{copa}).

Volumen de la copa (V_{copa}).

- ***Variables indirectas***

Relación $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$

Relación $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$

Índice de Área Foliar (*IAF*)

Funneling ratio (*FR*) (ver ecuación 4.2.1)

4. Resultados y discusión

4.2.2. Estudio de los parámetros de influencia sobre la escorrentía cortical.

Como se ha visto anteriormente (ver apartado 2.1), la escorrentía cortical o fustal (S_f) es el agua que fluye a través de hojas, yemas, ramas y ramillas hasta alcanzar el fuste principal o tronco, y llegar posteriormente a la superficie del suelo. A menudo tiene muy poca contribución en el ciclo hidrológico (Eamus, 2001) y depende principalmente de la estructura de la copa del árbol y de la disposición de sus ramas; una copa de árbol grande y ramas positivamente inclinadas (ramas en posición diagonal hacia arriba) recolectará y distribuirá mejor el agua hacia las ramas más gruesas y el tronco, en comparación a los árboles que tengan ramas en posición horizontal y negativamente inclinadas (diagonales y apuntando hacia abajo) (García Apaza, 2005).

Se han realizado las correlaciones entre los datos de escorrentía cortical acumulada y los atributos seleccionados (Tabla 4.2.1) en 6 individuos de *Pinus pinea* (4 de la zona antropizada y 2 del Arroyo Los Morales) para los datos recogidos entre Abril de 2014 y Abril de 2016. Dado que solo se dispone de datos de 2 ejemplares de *Cistus ladanifer*, no es posible analizar las correlaciones en esta especie.

Tabla 4.2.1. Datos para la correlación entre el porcentaje de S_f y las características morfológicas

	S_f (%)	h (m)	h_{fuste} (m)	h_{copa} (m)	A_{copa} (m ²)	V_{copa} (m ³)	DBH (m)	$h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$
P_{A1}	0.08	8.67	2.02	6.65	67.66	450.1	0.44	4.29
P_{A2}	0.13	8.10	2.54	5.56	52.52	291.7	0.37	3.19
P_{A3}	0.27	5.41	1.92	3.49	15.05	52.5	0.19	2.82
P_{A4}	0.16	6.83	2.29	4.54	25.25	114.8	0.25	2.98
P_{M1}	0.09	8.18	2.1	6.08	29.94	181.9	0.31	3.89
P_{M2}	0.13	9.74	2.39	7.35	34.1	314.8	0.34	4.08

En la figura 4.2.1 se observa como a mayor altura del árbol menor es la escorrentía cortical, existiendo una relación lineal negativa con $R^2=0,71$.

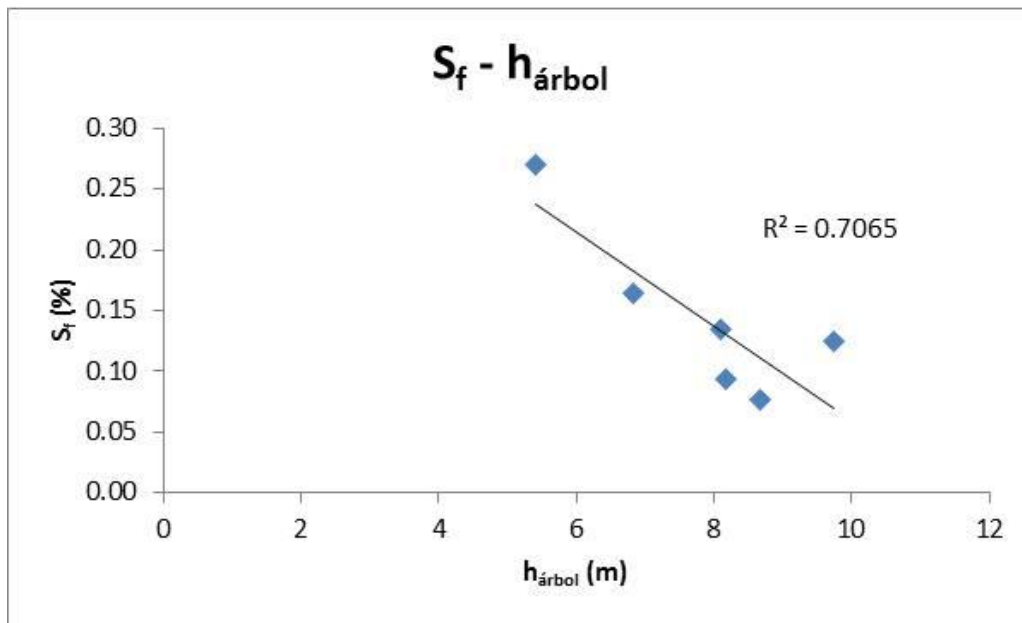


Figura 4.2.4. Correlación entre la S_f (%) y la $h_{\text{árbol}}$

El estudio de la escorrentía cortical en los individuos seleccionados permitió contrastar la importancia de la diferencia entre las alturas de los árboles, ya que una mayor altura del árbol hace que el agua tenga que recorrer más longitud y se produzcan pérdidas por la tortuosidad (rozamiento) con las ramas y el tronco.

Se constata como la escorrentía cortical es menor en los árboles de mayor altura, lo cual se corresponde con lo obtenido por Crockford y Richardson (1990) y García Ortiz (2006): Los mayores valores de índices de canalización (y por tanto mayor S_f) se dan en aquellos árboles de menor tamaño.

En cambio, en la figura 4.2.2 se puede observar que la relación con la característica h_{fuste} no está tan definido, ya que no se cumple que a medida que aumente el tamaño de fuste lo haga la S_f , no existiendo una relación significativa entre ambos conceptos ($R^2=0,22$).

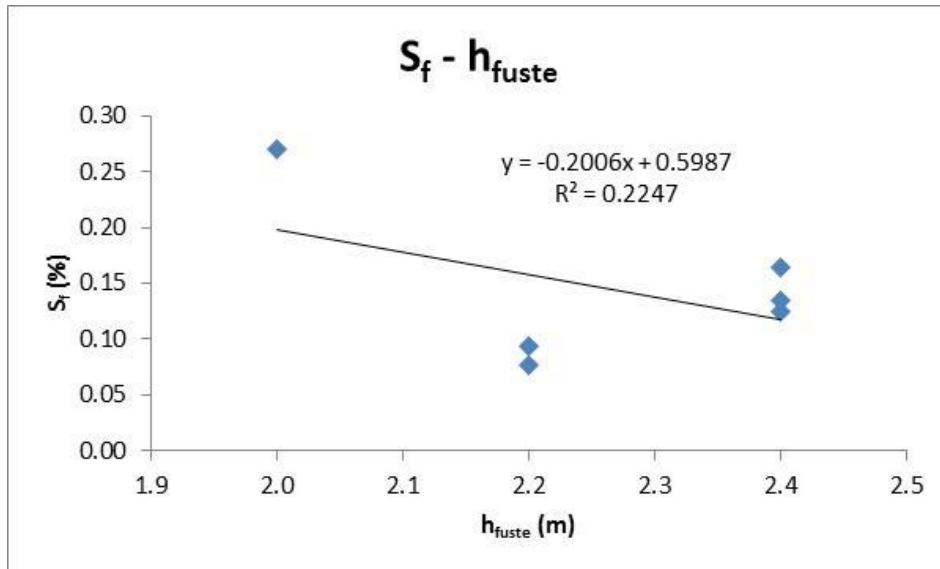


Figura 4.2.2. Correlación entre la S_f (%) y la h_{fuste}

No se encuentra una relación positiva que suponga un aumento de la S_f al incrementarse el tamaño de fuste. Como dice García Ortiz (2006): los troncos son eficientes recolectores de agua de lluvia, por lo que a mayor fuste mayor escorrentía cortical, aunque por otro lado a mayor fuste, mayor cantidad de ramillas, y por tanto menor S_f , por lo que son dos conceptos contrapuestos. En nuestro caso, domina claramente el segundo.

Con respecto al diámetro a la altura del pecho, en la figura 4.2.3 se puede interpretar cómo para las clases diamétricas menores la escorrentía cortical es mayor y viceversa.

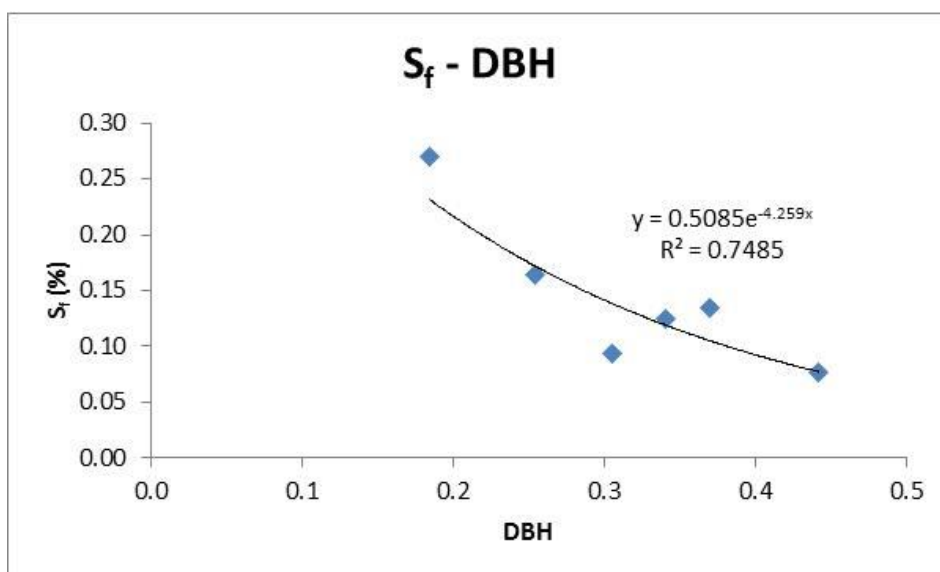


Figura 4.2.3. Correlación entre la S_f (%) y el DBH

Se verifica que para las clases diamétricas menores la escorrentía cortical es mayor que en aquellos pies de mayor diámetro. Esto se corresponde con lo obtenido por García Apaza (2005), que registró la mayor escorrentía cortical, tanto en pino piñonero como en pino carrasco, en la clase diamétrica menor.

Al hacer la correlación con la variable $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$ se observa cómo a mayor valor de este cociente (árbol con una gran copa y un fuste pequeño) menor es la S_f y a medida que decrece este cociente (el árbol disminuye su copa y aumenta su fuste) la S_f aumenta, existiendo una relación lineal negativa con $R^2=0,70$ (ver figura 4.2.4).

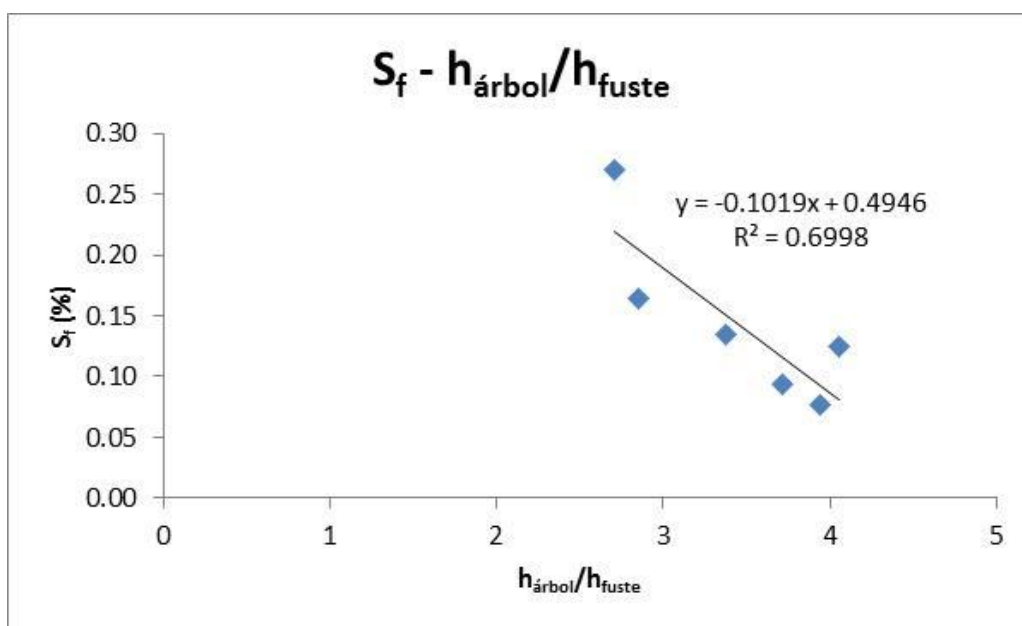


Figura 4.2.4. Correlación entre la S_f (%) y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$

Este estudio corrobora de nuevo lo obtenido por Crockford y Richardson (1990) y García Ortiz (2006) acerca de que los troncos son más eficientes recolectores de agua que las ramas y ramillas. Por tanto, los árboles de mayor tamaño, que poseen mayor cantidad de ramas y ramillas, recolectan menos agua.

Si se realiza la correlación entre $h_{\text{árbol}}$ y h_{copa} , la relación entre ambos conceptos es similar a la obtenida para $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$, pero inversa: a mayor cociente (árbol con una copa corta) mayor es la S_f (ver figura 4.2.5). Se establece una relación lineal positiva con un coeficiente de correlación de $R^2=0,78$.

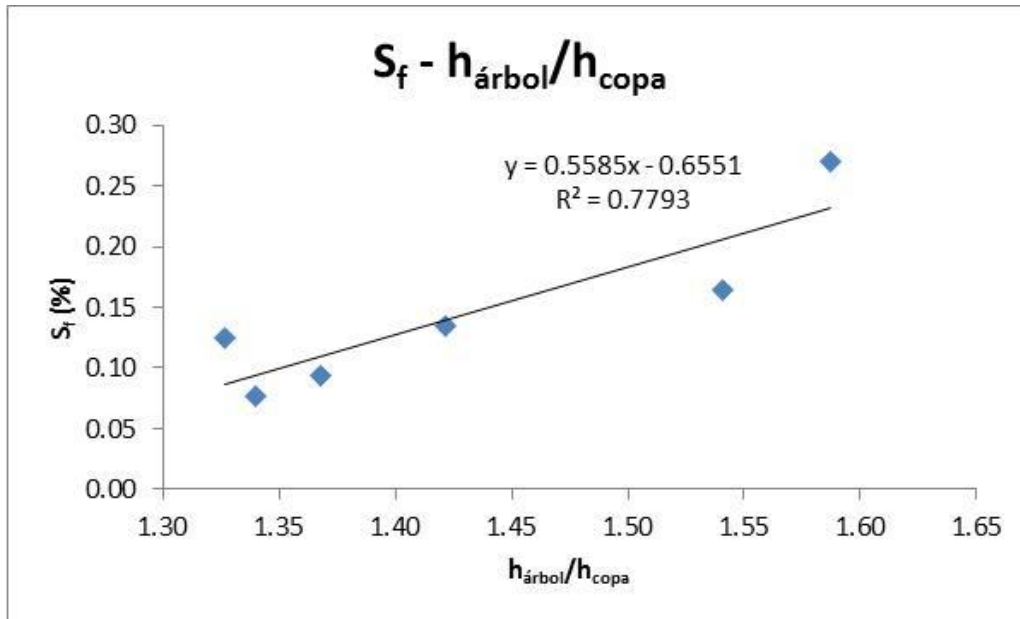


Figura 4.2.5. Correlación entre la S_f (%) y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$

En la figura 4.2.6 se observa que a menor altura de copa mayor es la S_f , con una relación logarítmica significativa ($R^2 = 0,79$).

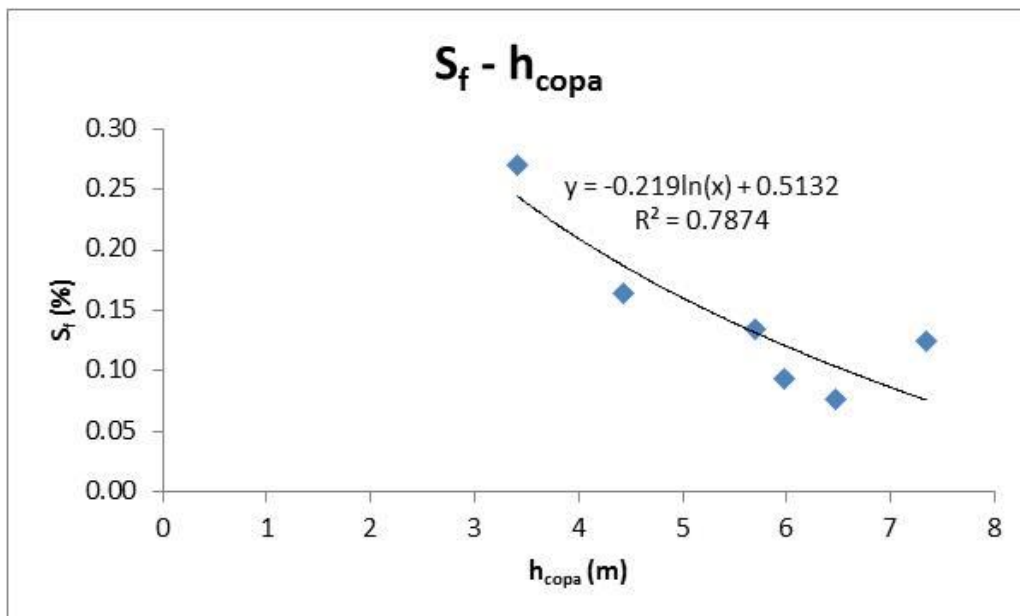


Figura 4.2.6. Correlación entre la S_f (%) y la h_{copa}

En esta correlación se demuestra nuevamente la teoría comentada en los apartados anteriores: a menor altura de copa mayor es la S_f , es decir, que aquellos árboles con menor copa, a igualdad de altura de fuste producirán mayor S_f .

Como puede observarse en la figura 4.2.7, se cumple que a menor área de copa mayor es la S_f , estableciéndose una relación logarítmica entre ambos conceptos, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,70$.

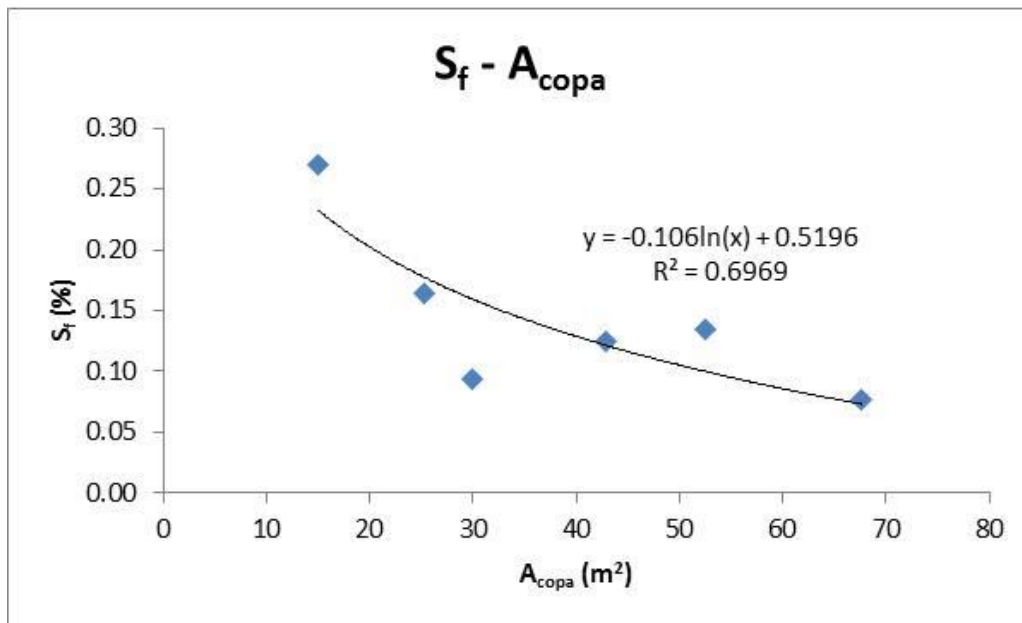


Figura 4.2.7. Correlación entre la S_f (%) y el A_{copa}

De igual forma que en el caso anterior, se cumple que para aquellos pies de menor volumen de copa, mayor es la S_f y viceversa (ver figura 4.2.8). Se establece una relación logarítmica con un coeficiente de correlación de $R^2=0,78$.

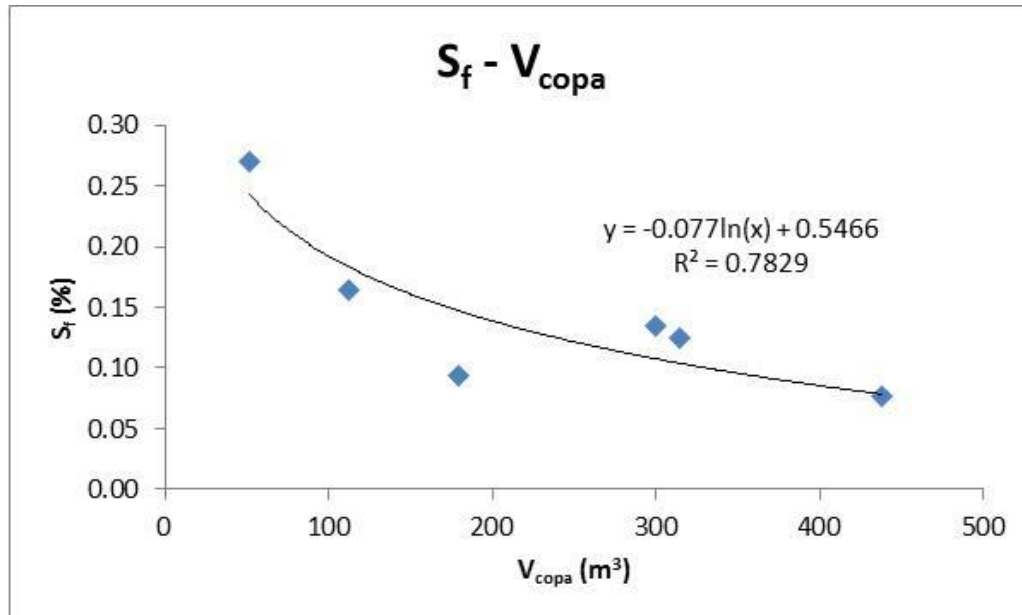


Figura 4.2.8. Correlación entre la S_f (%) y el V_{copa}

La influencia de los factores estructurales en la S_f también se ha estudiado mediante el uso del coeficiente denominado “funneling ratio” (FR) que relaciona las características del dosel y del tronco de la planta con la S_f . El “funneling ratio” (FR) se determinó usando la ecuación 4.2.1:

4. Resultados y discusión

$$FR = \frac{S_f}{B * P} \quad (4.2.1)$$

donde, S_f es la escorrentía cortical (L), B el área basal del tronco (m^2), y P es la precipitación incidente (mm) (Herwitz, 1986). Un FR por encima de uno indica que partes externas del área de la copa proyectada contribuyen al drenaje de escorrentía cortical (Levia, 2003).

Los valores obtenidos de FR para para los diferentes ejemplares estudiados aparecen en la tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.2. Valores del funneling ratio de los ejemplares de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. Entre paréntesis se muestra la desviación estándar.

	P _{A1}	P _{A2}	P _{A3}	P _{A4}	P _{M1}	P _{M2}	J1	J2
FR (SD)	0.16 (0.21)	0.35 (0.37)	0.80 (0.98)	0.60 (0.56)	0.27 (0.35)	0.27 (0.31)	35.0 (23.0)	4.78 (4.81)

La figura 4.2.9 muestra que FR está relacionado con la cantidad de agua de lluvia, probablemente debido a que cuando la corteza está saturada, la circulación a través del tronco y las ramas aumenta con la intensidad de la lluvia. Tal incremento se acerca a un límite asintótico para grandes eventos de lluvia, debido a la limitada capacidad de transporte de agua del tallo y las ramas del árbol.

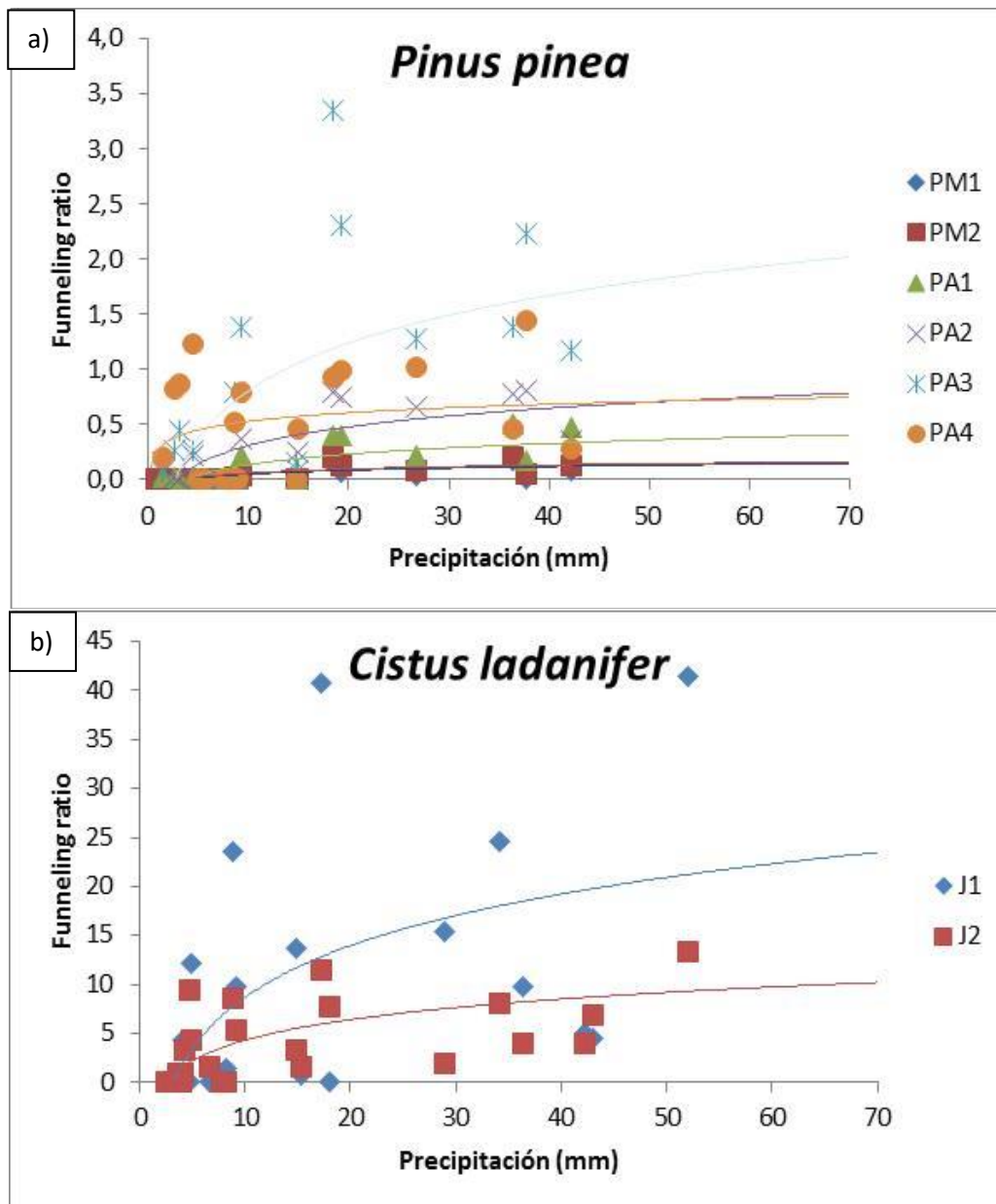


Figura 4.2.9. Relación entre el Funneling ratio (*FR*) y la precipitación (mm) en *Pinus pinea* (a) y *Cistus ladanifer* (b)

En la figura 4.2.10 se observa la correlación existente entre el parámetro *FR* y la escorrentía cortical. Se establece una relación lineal con un coeficiente de correlación de $R^2=0,92$, el más alto obtenido de todos los parámetros analizados.

4. Resultados y discusión

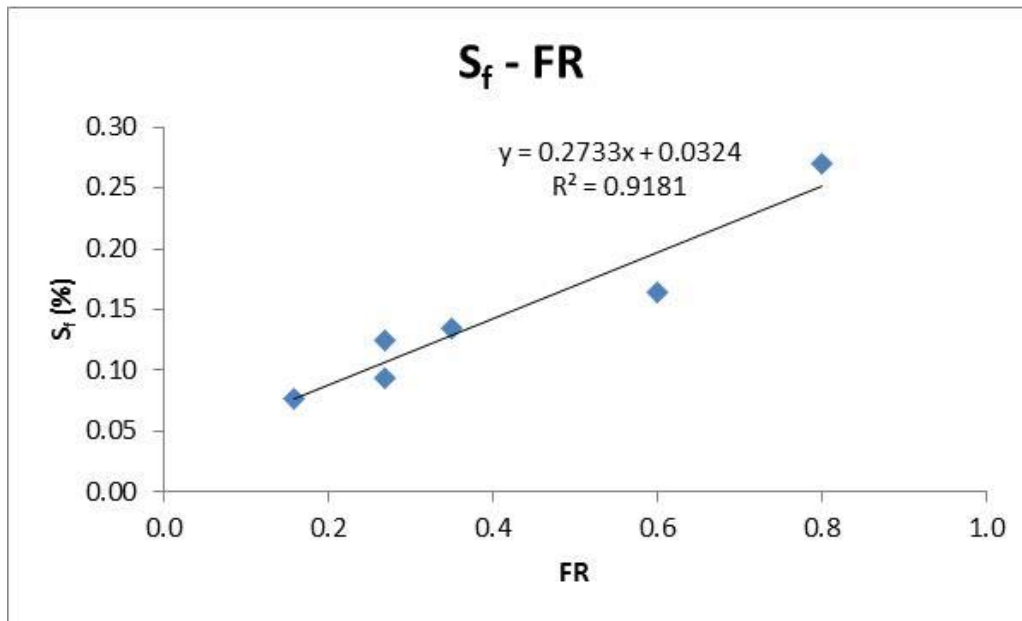


Figura 4.2.10. Correlación entre la S_f (%) y el FR

Los valores de IAF para los diferentes ejemplares han sido obtenidos mediante los procesos detallados en el apartado 3.4.2, y los resultados se muestran en la tabla 4.2.3.

Tabla 4.2.3. Valores del IAF de los ejemplares de *Pinus pinea*.

	P _{A1}	P _{A2}	P _{A3}	P _{A4}	P _{A5}	P _{A6}	P _{A7}	P _{A8}	P _{M1}	P _{M2}
IAF	1.4	1.5	1.2	1.3	1.8	0.9	0.9	0.9	1.5	1.6

En la figura 4.2.11 se observa la correlación existente entre el IAF y la escorrentía cortical. Lógicamente, a medida que aumenta el valor del IAF , disminuye la S_f .

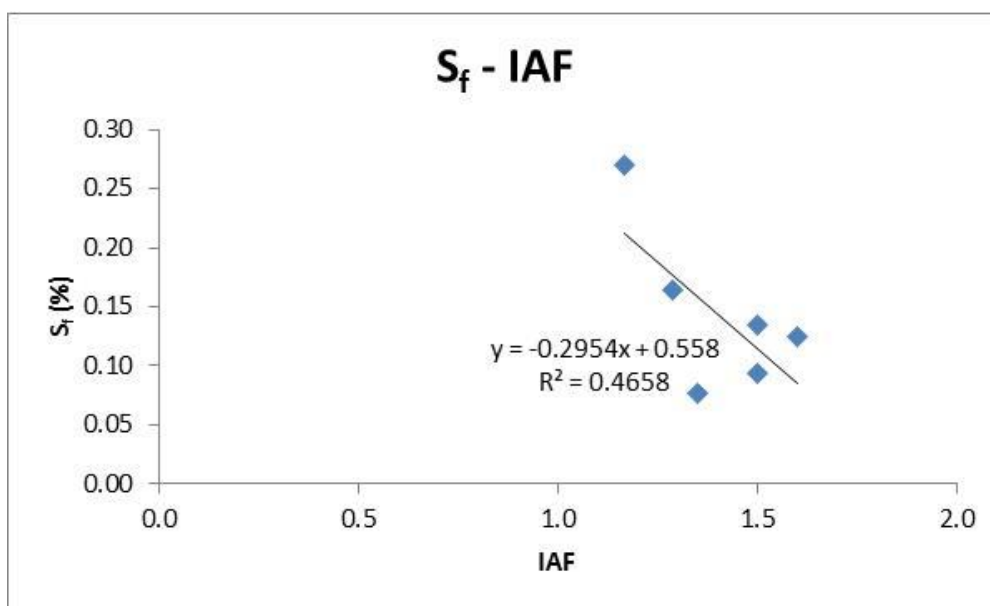


Figura 4.2.11. Correlación entre la S_f (%) y el IAF

4.2.3. Estudio de los parámetros de influencia sobre la trascolación.

Se han realizado las correlaciones entre el porcentaje de trascolación que ha tenido lugar desde el 1 de abril de 2014 (fecha en que se inicia las medidas en la zona antropizada) hasta el 1 de abril de 2016, y los atributos seleccionados en los 10 individuos de *Pinus pinea* (tabla 4.2.4). Al igual que en el caso anterior, al disponer de datos de 2 ejemplares de *Cistus ladanifer*, no es posible analizar las correlaciones en esta especie.

Tabla 4.2.4. Datos para la correlación entre el porcentaje de Tr y las características morfológicas

	Tr (%)	h (m)	h _{fuste} (m)	h _{copa} (m)	A _{copa} (m ²)	V _{copa} (m ³)	DBH (m)	h _{árbol} /h _{fuste}	h _{árbol} /h _{copa}
P_{A1}	67.2	8.67	2.02	6.65	67.66	450.1	0.44	3.94	1.30
P_{A2}	70.2	8.10	2.54	5.56	52.52	291.7	0.37	3.37	1.46
P_{A3}	81.3	5.41	1.92	3.49	15.05	52.5	0.19	2.70	1.55
P_{A4}	76.6	6.83	2.29	4.54	25.25	114.8	0.25	2.85	1.50
P_{A5}	66.3	8.61	1.97	6.64	36.89	244.9	0.46	4.10	1.30
P_{A6}	74.0	9.66	2.1	7.56	41.02	310	0.37	4.60	1.28
P_{A7}	75.5	9.57	2.68	6.89	40.23	277.2	0.40	3.57	1.39
P_{A8}	76.5	9.72	3.17	6.55	42.98	281.5	0.36	3.07	1.48
P_{M1}	67.2	8.18	2.10	6.08	29.94	181.9	0.31	3.72	1.35
P_{M2}	66.3	9.74	2.39	7.35	42.82	314.8	0.34	4.06	1.33

4. Resultados y discusión

En la figura 4.2.12 se puede observar que no existe una alta correlación entre el porcentaje de trascolación y la altura del árbol.

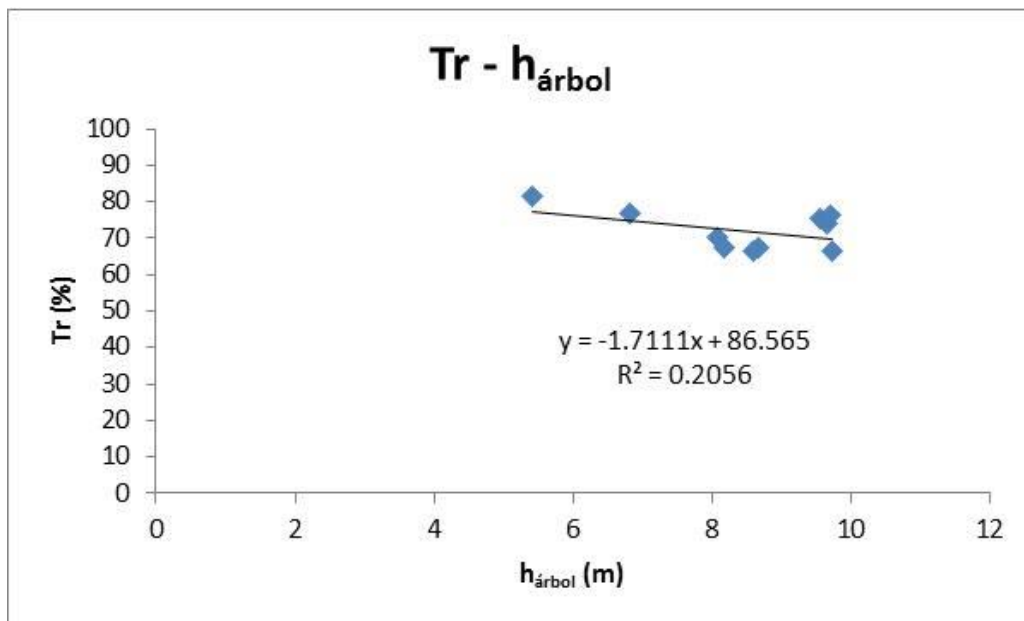


Figura 4.2.12. Correlación entre la Tr (%) y la $h_{\text{árbol}}$

Con respecto a la altura del fuste, en la figura 4.2.13 se puede observar que, al igual que en el caso anterior, no existe correlación entre esta característica del árbol y la trascolación.

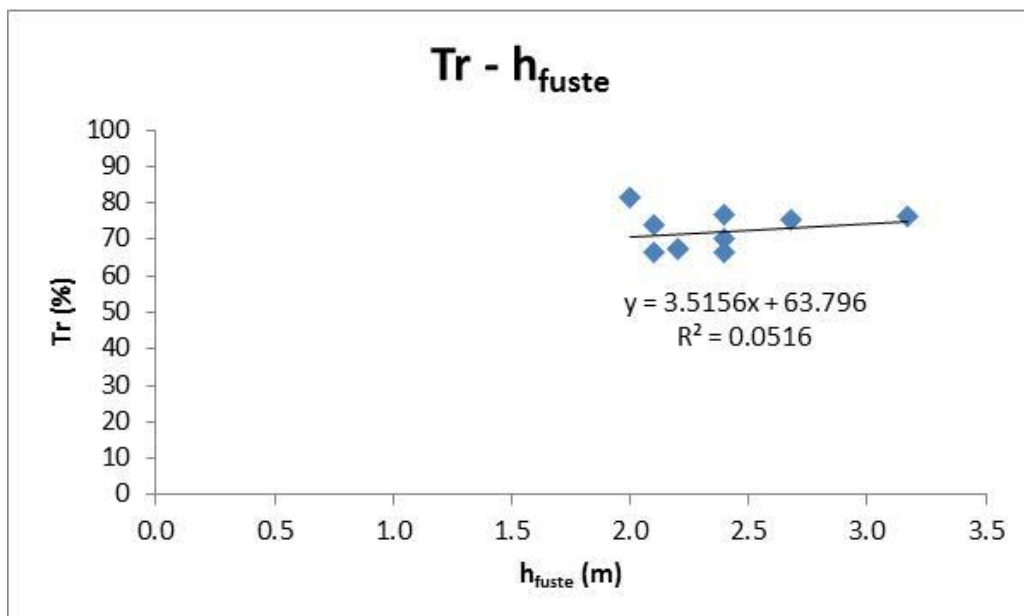


Figura 4.2.13. Correlación entre la Tr (%) y la h_{fuste}

Al examinar las correlaciones entre el porcentaje de trascolación y los atributos $h_{\text{árbol}}$ y h_{fuste} , se puede decir que no existe relación entre ellas ó no existe un patrón definido, ya que los coeficientes de correlación son muy bajos.

Con respecto a la relación $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$ en la figura 4.2.14 se observa una relación lineal negativa con el porcentaje de trascolación.

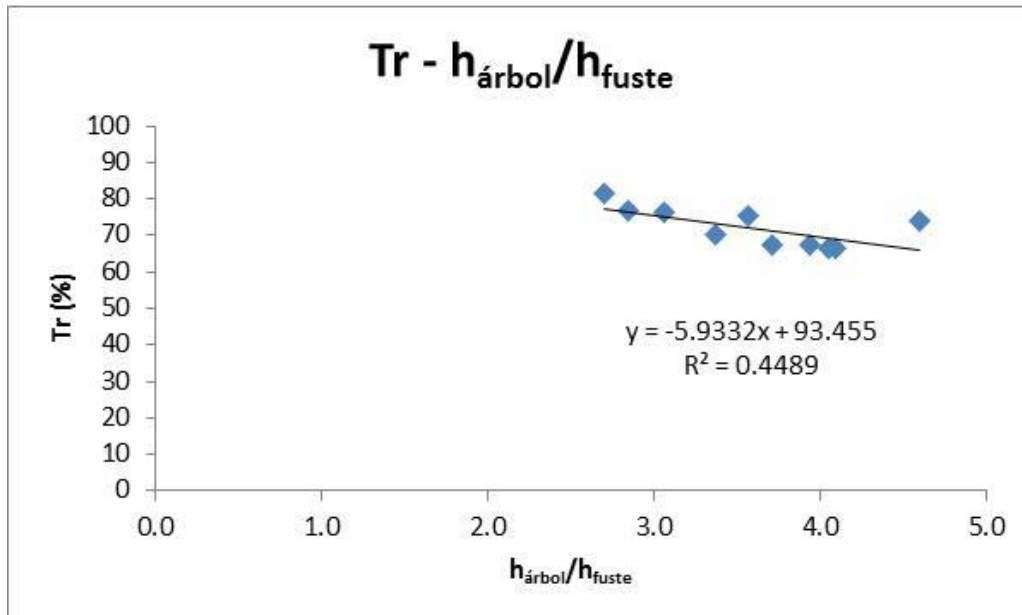


Figura 4.2.14. Correlación entre la Tr (%) y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$

En la figura 4.2.15 se observa una relación lineal directa entre trascolación y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$.

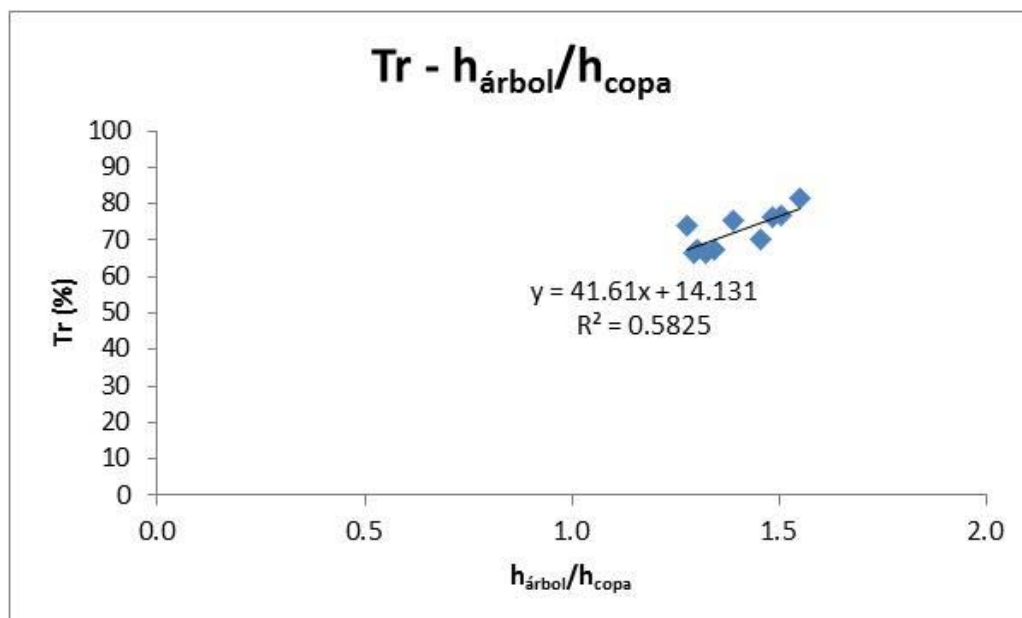


Figura 4.2.15. Correlación entre la Tr (%) y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$

Al igual que ocurre con la escorrentía cortical, al hacer la correlación de la trascolación con las variables $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$ y $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$, se observa que a mayor valor del primer cociente (árbol con una gran altura y un fuste corto) menor es el porcentaje de

4. Resultados y discusión

Tr , existiendo una relación lineal negativa con $R^2=0,45$. La segunda variable, $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$, produce el efecto contrario, al aumentar de valor su cociente (un pino con una altura grande en comparación con la altura de su dosel) la Tr aumenta, existiendo una relación lineal positiva con $R^2=0,58$.

Con respecto al diámetro a la altura del pecho, en la figura 4.2.16 se puede observar cómo para menor DBH la trascolación es mayor y viceversa, obteniéndose una relación lineal con un coeficiente de correlación intermedio.

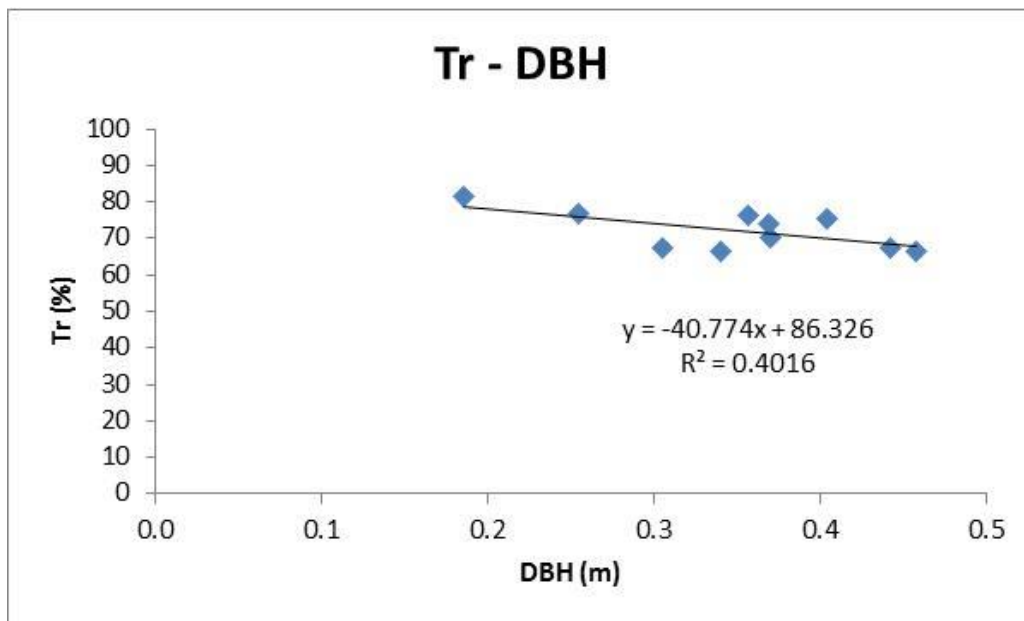


Figura 4.2.16. Correlación entre la Tr (%) y el DBH

Se puede observar como para menor DBH la trascolación es mayor, como obtuvo Serrano Muela (2012): la trascolación en árboles de diámetro pequeño era mayor (68%) que la de aquellos de diámetro grande (60%). Centrándonos en estudios de coníferas, García Apaza (2005) obtuvo que en pino piñonero la trascolación en árboles de diámetro pequeño era mayor que la de aquellos de diámetro grande. Sin embargo la relación no tiene un coeficiente de correlación demasiado alto, $R^2= 0,40$

En la figura 4.2.17 se puede observar que no existe una correlación significativa entre el porcentaje de trascolación y la altura de copa.

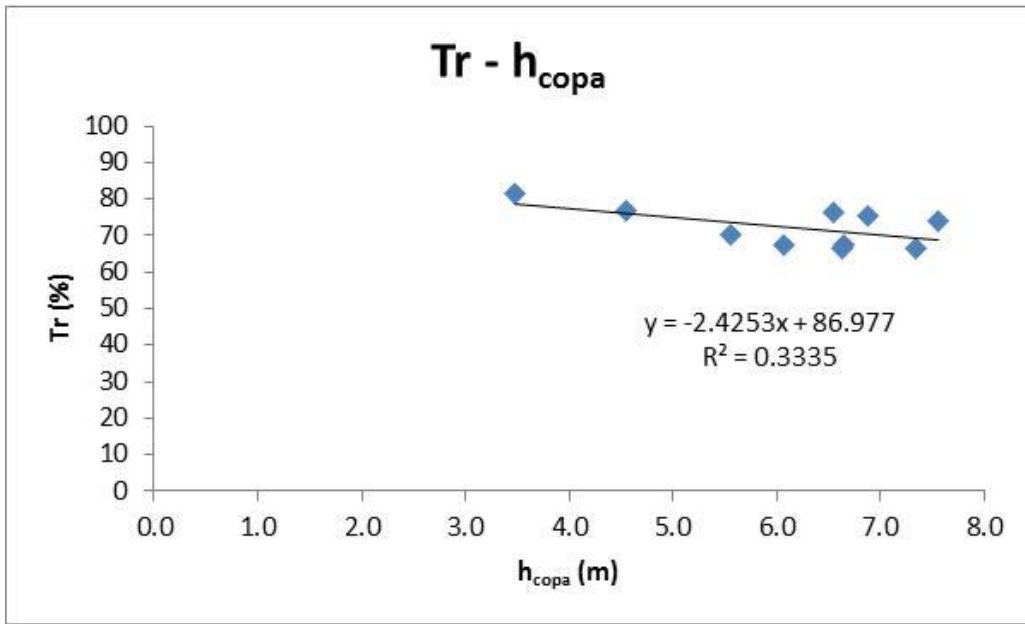


Figura 4.2.17. Correlación entre la Tr (%) y la h_{copa}

En la figura 4.2.18 se observa cómo, de forma general, se cumple que para menor área de copa mayor es la trascolación. Se establece una relación lineal negativa con $R^2=0,42$.

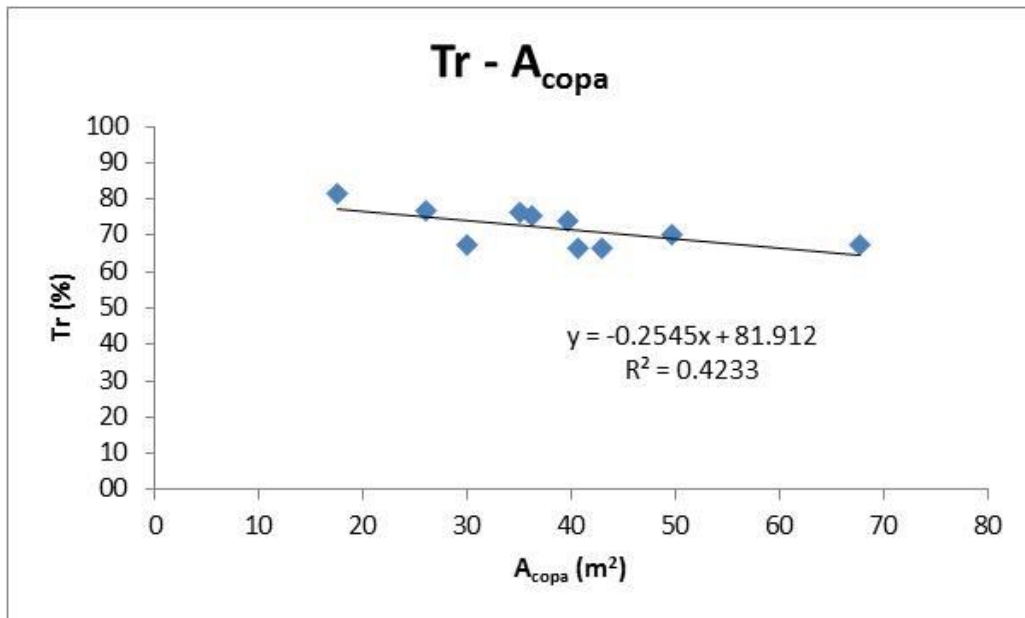


Figura 4.2.18. Correlación entre la Tr (%) y el A_{copa}

Con respecto al volumen de copa, en la figura 4.2.19 se observa que para menor volumen de copa mayor es la trascolación. La relación lineal entre ambos atributos es negativa, con $R^2=0,34$.

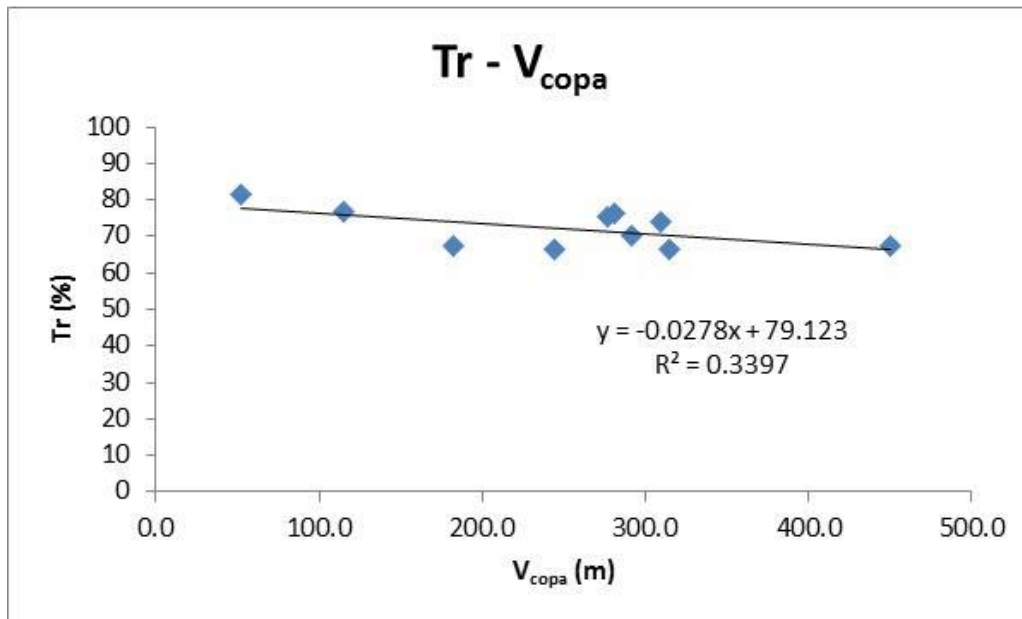


Figura 4.2.19. Correlación entre la Tr (%) y el V_{copa}

La relación entre los atributos de la estructura del dosel en *Pinus pinea* (altura, área de proyección, volumen) y la trascolación es del tipo lineal negativa con coeficientes de correlación de 0,34-0,42. Aunque no se trata de coeficientes demasiado altos, se puede decir que existe una relación entre ellos, como ya encontró García Ortiz (2006), estableciéndose que la trascolación depende de la estructura de la copa.

Finalmente, se relaciona el índice de área foliar (IAF) de la cobertura vegetal con la trascolación. Generalmente, este índice ha sido relacionado linealmente con la capacidad de almacenamiento del dosel (S) (Aston, 1979; Liu, 1997; van Dijk y Bruijnzeel, 2001, Méndez Monroy, 2013), a partir de la ecuación 4.2.2:

$$S = S_L IAF \quad (4.2.2)$$

donde S_L es la capacidad de almacenamiento de las hojas, es decir, la cantidad de agua que puede ser retenida por las hojas de un dosel por unidad de área de las hojas.

En la figura 4.2.20 se observa la relación entre el porcentaje de trascolación y el índice de área foliar (IAF), y como, a medida que aumenta el valor del IAF , va disminuyendo la trascolación, como era de esperar, al existir un menor número de huecos en el dosel por el que pueda pasar la precipitación incidente.

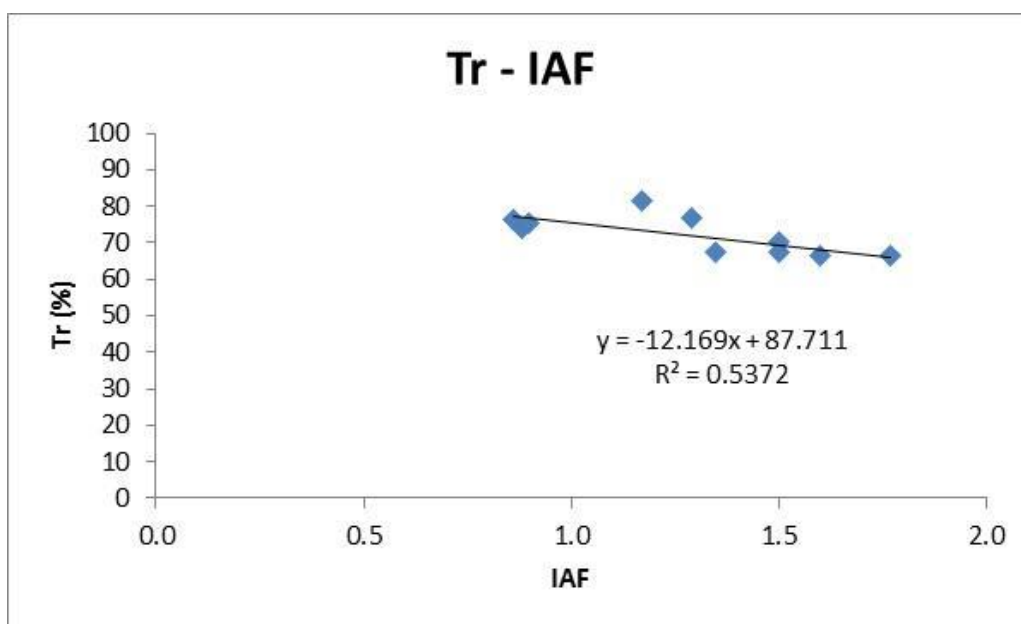


Figura 4.2.20. Correlación entre la *Tr* (%) y el *IAF*

4.2.4. Estudio de los parámetros de influencia sobre la interceptación.

El proceso de interceptación de la lluvia está determinado por las características de la precipitación (Gerrits y Savenije, 2011), por la arquitectura de la copa del árbol (Crockford y Richardson, 1990) y por factores meteorológicos (Rutter et al., 1971).

Se han analizado 10 individuos de *Pinus pinea* (8 de la zona antropizada y 2 del Arroyo Los Morales) y se han realizado las correlaciones entre el porcentaje de agua interceptada por el dosel para el periodo comprendido entre Abril de 2014 y Abril de 2016, y los atributos seleccionados (Tabla 4.2.5).

Tabla 4.2.5. Datos para la correlación entre el porcentaje de *I* y las características morfológicas

	<i>I</i> (%)	<i>h</i> (m)	<i>h</i> _{fuste} (m)	<i>h</i> _{copa} (m)	<i>A</i> _{copa} (m ²)	<i>V</i> _{copa} (m ³)	DBH (m)	<i>h</i> _{árbol} / <i>h</i> _{fuste}	<i>h</i> _{árbol} / <i>h</i> _{copa}
P_{A1}	23.5	8.67	2.2	6.65	67.66	450.1	0.44	3.94	1.30
P_{A2}	25.9	8.10	2.4	5.56	52.52	291.7	0.37	3.37	1.46
P_{A3}	27.9	5.41	2.0	3.49	15.05	52.5	0.19	2.70	1.55
P_{A4}	23.2	6.83	2.4	4.54	25.25	114.8	0.25	2.85	1.50
P_{A5}	27.5	8.61	2.1	6.64	36.89	244.9	0.46	4.10	1.30
P_{A6}	18.7	9.66	2.1	7.56	41.02	310	0.37	4.60	1.28
P_{A7}	24.5	9.57	2.7	6.89	40.23	277.2	0.40	3.57	1.39
P_{A8}	29.8	9.72	3.2	6.55	42.98	281.5	0.36	3.07	1.48
P_{M1}	32.8	8.18	2.2	6.08	29.94	181.9	0.31	3.72	1.35
P_{M2}	33.5	9.74	2.4	7.35	42.82	314.8	0.34	4.06	1.33

4. Resultados y discusión

En la figura 4.2.21 se observa una baja correlación entre la interceptación y la altura del árbol, aunque refleja que a menores alturas de árbol la interceptación es menor que para alturas de árbol mayores. El coeficiente de correlación obtenido es $R^2=0,22$.

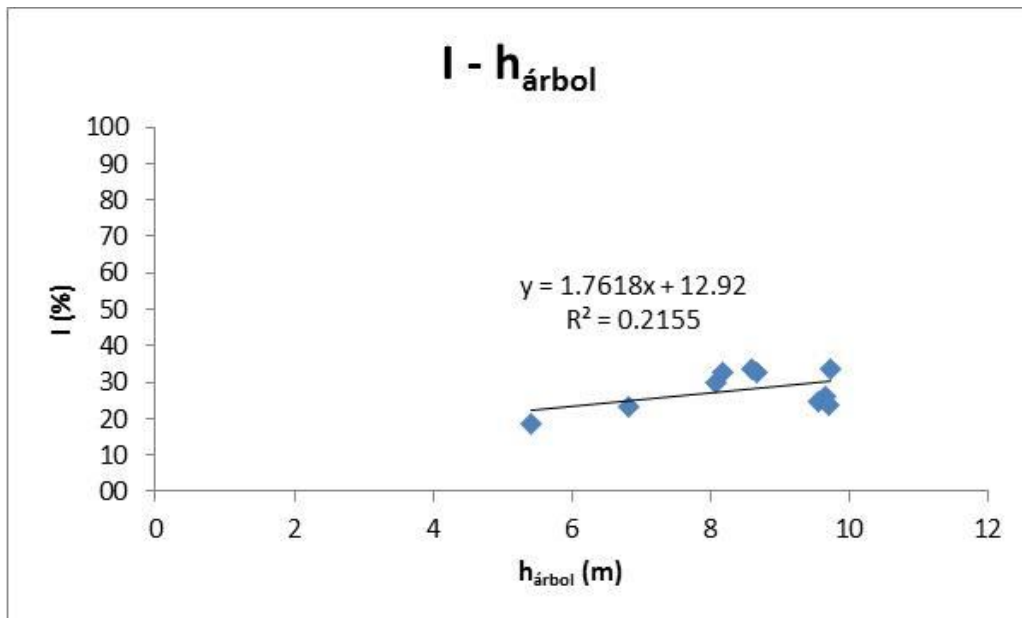


Figura 4.2.21. Correlación entre la I (%) y la h_{árbol}

En cuanto a la altura del fuste, en la figura 4.2.22 no se observa correlación entre esta variable y la interceptación.

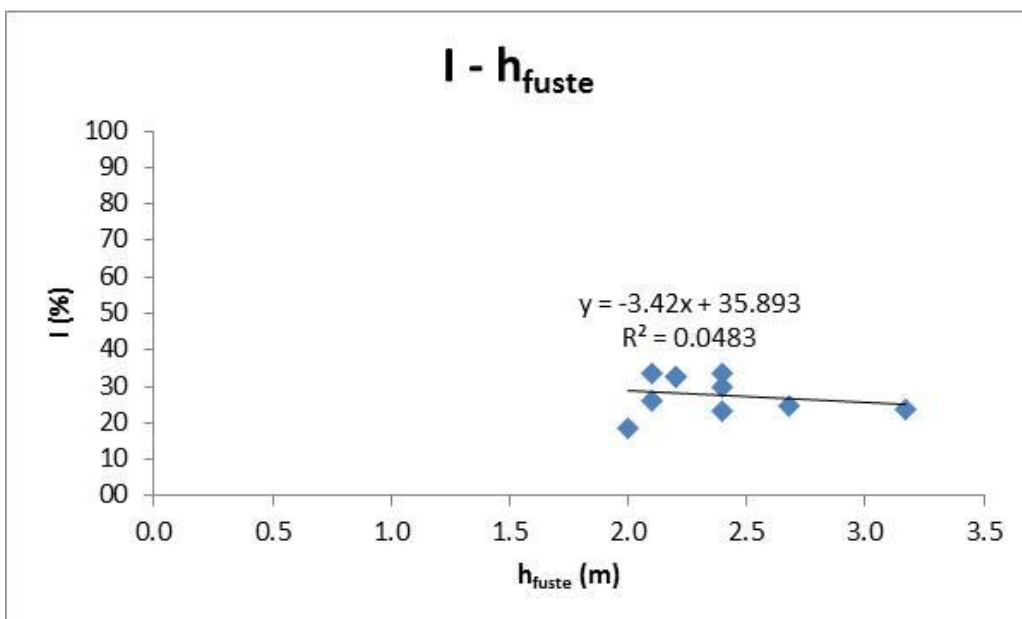


Figura 4.2.22. Correlación entre la I (%) y la h_{fuste}

La falta de correlación entre ambas variables es consecuencia a que tampoco existe entre la trascolación, variable dominante frente a la escorrentía cortical, y la altura del fuste.

En la figura 4.2.23 se observa que hay una relación lineal positiva entre las variables interceptación y el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$ ($R^2=0,46$). Aunque para el menor valor del índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$ la interceptación es mínima, para el máximo valor del índice, se da un valor de interceptación muy similar al que se obtiene con un valor intermedio.

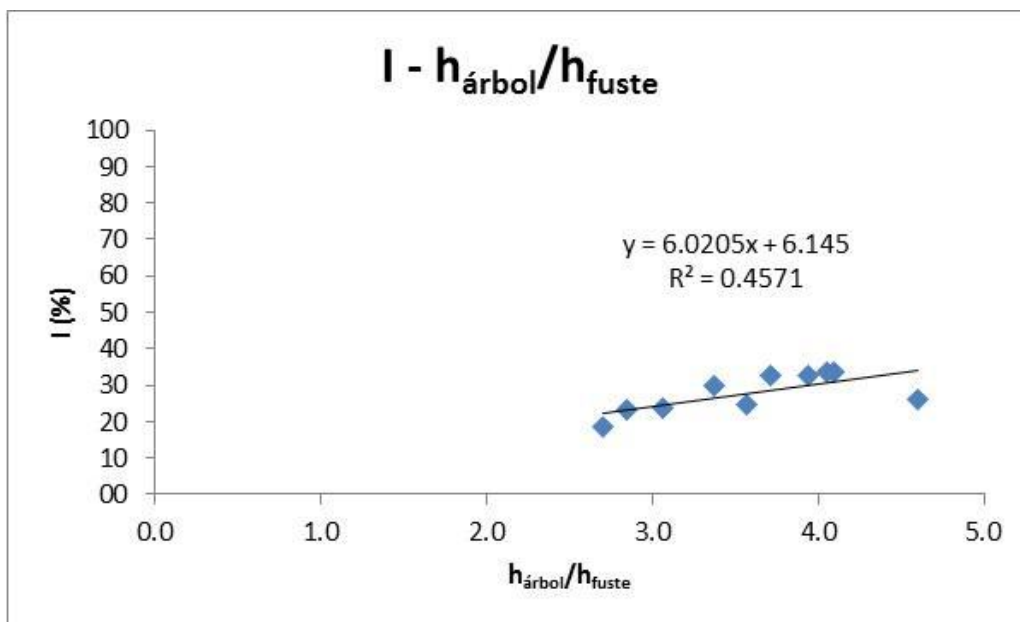


Figura 4.2.23. Correlación entre la I (%) y la $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$

Con el índice $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$, ocurre prácticamente lo mismo que en el caso anterior, aunque en esta ocasión la relación lineal es negativa, como puede observarse en la figura 4.2.24, con un valor del coeficiente de correlación más alto ($R^2=0,59$).

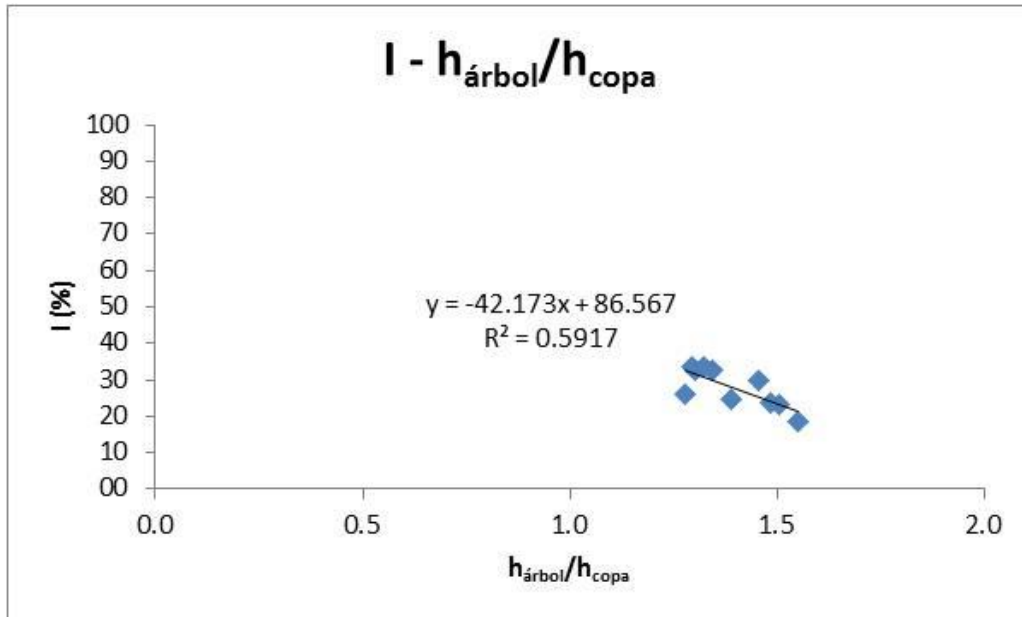


Figura 4.2.24. Correlación entre la I (%) y la $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$

Con respecto al diámetro a la altura del pecho, en la figura 4.2.25 se puede observar cómo a medida que aumenta el DBH también lo hace la interceptación, estableciéndose una relación lineal positiva, con coeficiente de correlación $R^2 = 0,41$.

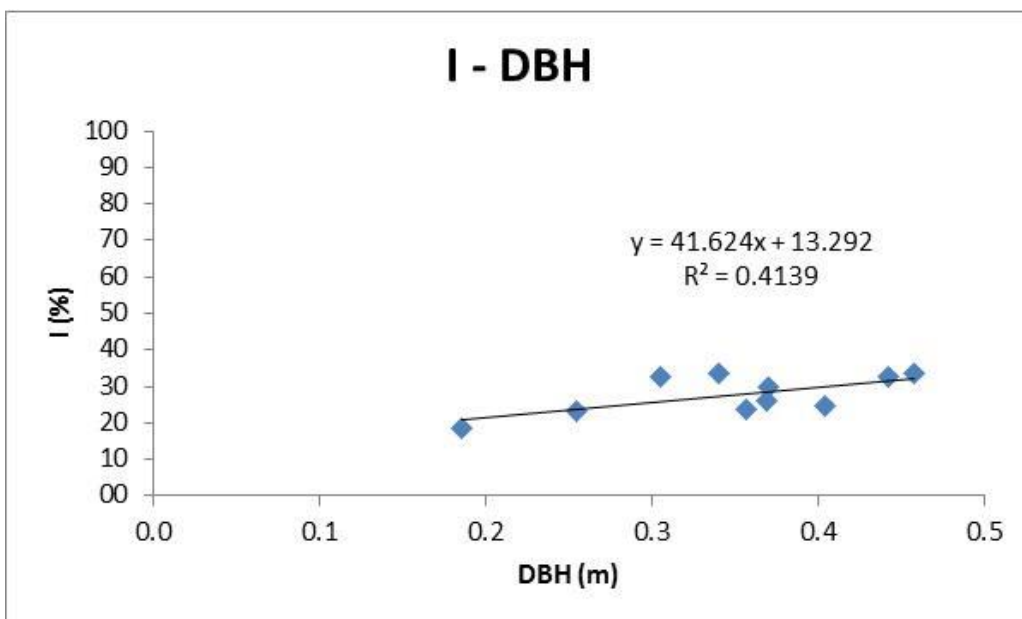


Figura 4.2.25. Correlación entre la I (%) y el DBH

Se puede observar cómo para el menor DBH la interceptación es mínima, y viceversa, como obtuvo Serrano Muela (2012): puesto que la interceptación es la precipitación menos trascolación y escorrentía cortical, en una clase diamétrica pequeña al aumentar la trascolación disminuye la interceptación.

También se corresponde con los resultados García Apaza (2005) en su estudio del pino piñonero, donde observó que en los árboles de diámetro menor existe una menor cantidad de agua interceptada en comparación con los de diámetro mayor, destacándose así la importancia de la estructura del árbol.

En la figura 4.2.26 se observa la correlación entre la interceptación y la altura de copa.

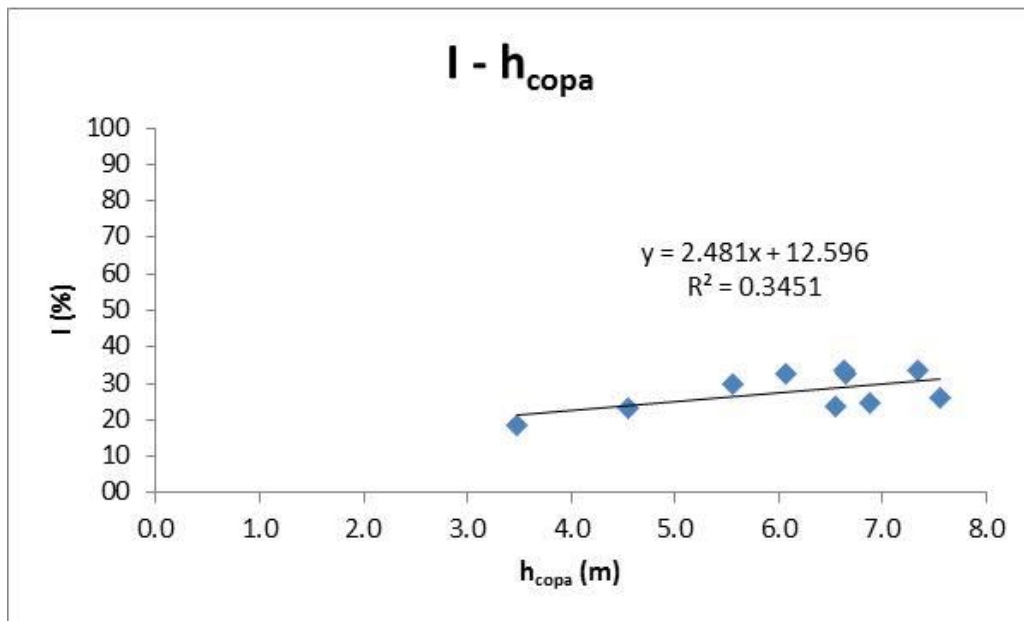


Figura 4.2.26. Correlación entre la I (%) y la h_{copa}

Se observa una relación lineal positiva entre interceptación y altura de la copa, con $R^2=0,34$, es decir, a menor altura de copa menor es la interceptación, y a medida que aumenta la altura de la copa lo hace también la interceptación. Efectivamente, la relación entre la trascolación y altura de copa es justamente negativa y, aproximadamente, del mismo valor (ver figura 4.2.17).

Con respecto al área de copa, en la figura 4.2.27 se establece una relación lineal positiva con un grado de correlación entre ambas variables de $R^2= 0,31$. Se observa que para menor área de copa la interceptación es mínima y aumenta a medida que lo hace el área de copa.

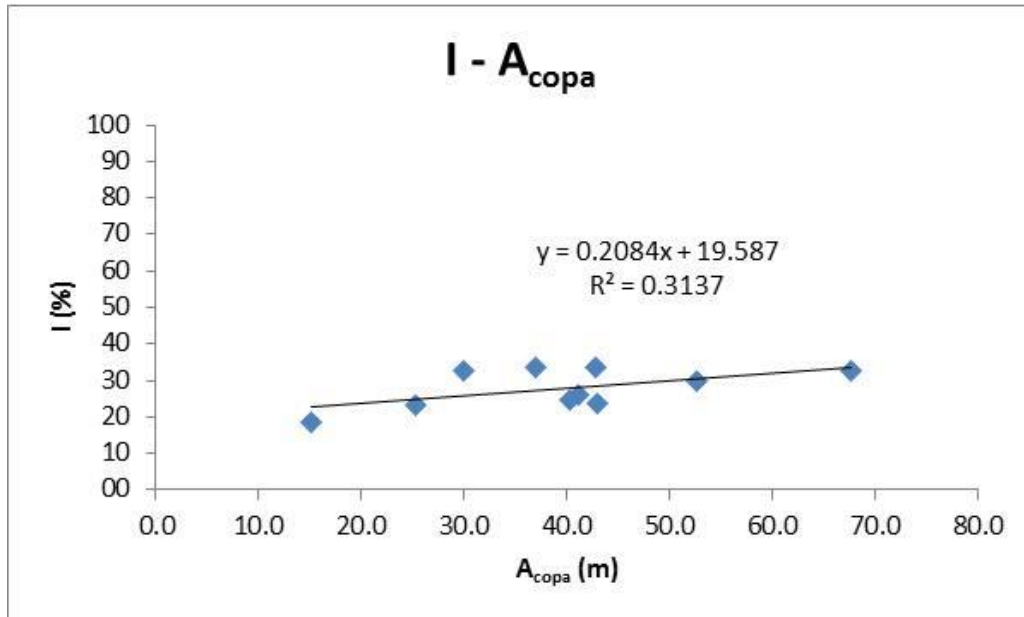


Figura 4.2.27. Correlación entre la I (%) y el A_{copa}

En la figura 4.2.28 se obtiene una relación lineal con coeficiente de correlación $R^2 = 0,35$. Al igual que ocurre con el área de la copa del árbol, se cumple que para menor volumen de copa menor es la interceptación.

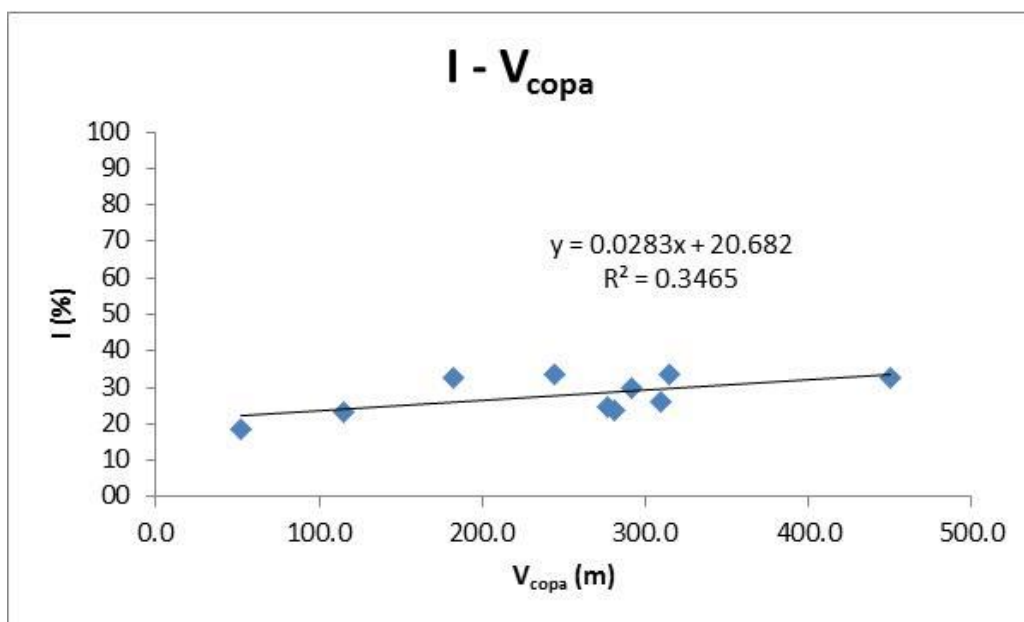


Figura 4.2.28. Correlación entre la I (%) y el V_{copa}

Los atributos de la estructura del dosel en *Pinus pinea* (altura, área de proyección, volumen) muestran la misma tendencia con respecto a la interceptación que los que tienen en relación a la trascolación, aunque, lógicamente, y a diferencia de lo que ocurría con la trascolación, en este caso se obtiene una relación lineal positiva entre las variables y la interceptación. Estos resultados se corresponden con lo obtenido por

García Apaza (2005), que ya observó la importancia que la estructura del dosel juega en la partición de la precipitación incidente y, por tanto, en la interceptación.

En la figura 4.2.29 se observa la relación entre el porcentaje de interceptación y el índice de área foliar (*IAF*), y como a medida que aumenta el valor del *IAF* va aumentando la interceptación del dosel.

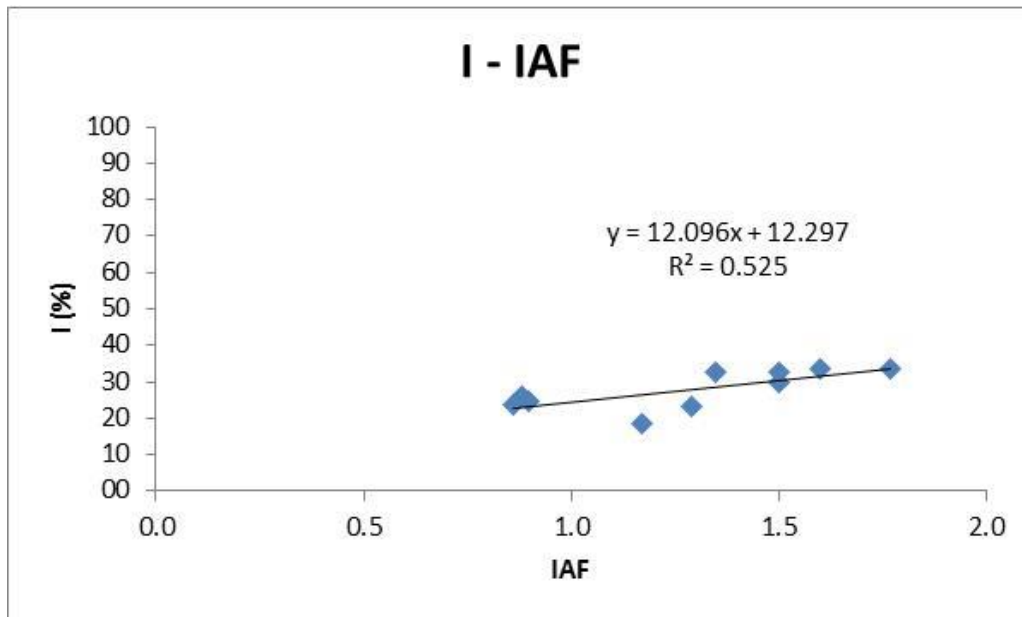


Figura 4.2.29. Correlación entre la *I* (%) y el *IAF*

Las variables *IAF* y $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$ son las que mayor influencia tienen en la interceptación, la primera con una relación directa, aumentando el porcentaje de interceptación con el aumento del *IAF*, y la segunda con una relación lineal negativa, de forma que a mayor valor del cociente (árbol con una gran altura y un dosel corto) menor es el porcentaje de *I*.

4.2.5. Modelo de regresión NDVI-IAF.

Las medidas del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) se pueden utilizar para calcular o aproximar el valor del *IAF*. Los valores de NDVI varían típicamente de 0 a 1, lo que representa un bajo y un alto *IAF*, respectivamente. Es posible establecer un modelo para un dosel específico que permitirá convertir los valores de NDVI en *IAF*. El sensor SRS-NDVI instalado en P_{M1} (ver apartado 3.4.3) mide la reflectancia del dosel en las longitudes de onda rojas y NIR, lo que permite el cálculo del NDVI.

Para estimar directamente *IAF* usando los valores del NDVI, se necesita desarrollar una relación correlativa entre ambos para un dosel específico. La mejor

4. Resultados y discusión

manera es tomar mediciones conjuntas de NDVI y del *IAF* (por ejemplo, usando un interceptómetro LP-80 o una imagen hemisférica). En nuestro caso, las mediciones de *IAF* y NDVI fueron adquiridas durante algo más de un año, desde Febrero de 2015 hasta Abril de 2016. La regresión de mínimos cuadrados se usa para ajustar un modelo lineal a estos datos (Fig. 4.2.30). Este modelo se puede utilizar para predecir el valor del *IAF* a partir de las medidas del sensor SRS-NDVI, con una fiabilidad de $R^2=0,77$.

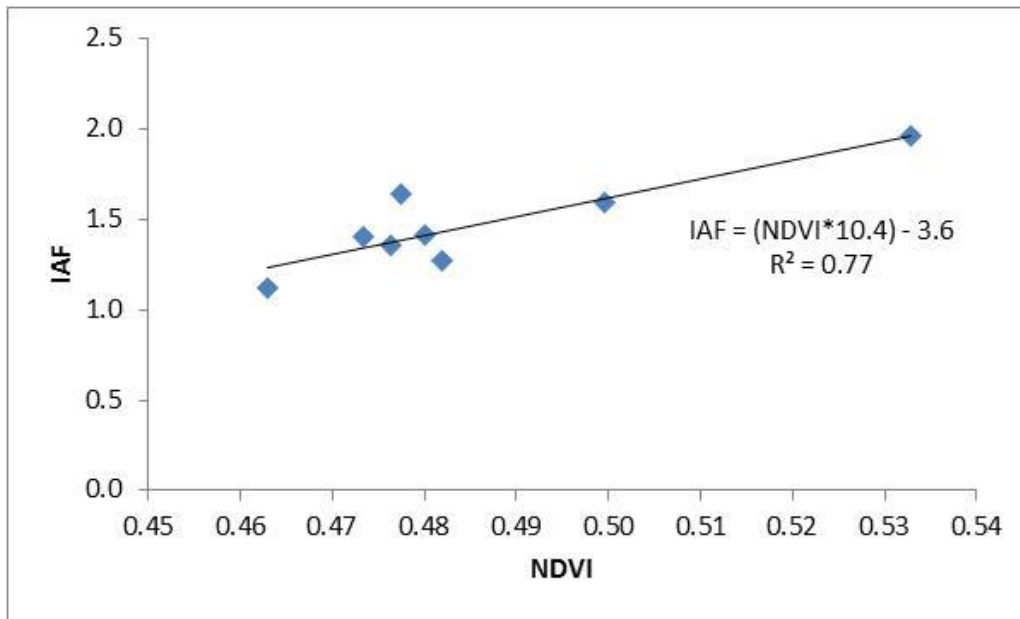


Figura 4.2.30. Correlación entre NDVI y el *IAF*

En la figura 4.2.31 se ha representado la evolución temporal de los valores de NDVI y del *IAF* durante el periodo comprendido entre Febrero de 2015 y Abril de 2016. Se observa como cuando tiene lugar un evento de precipitación los valores de NDVI son muchos mayores, mostrando irregularidades en su tendencia, por lo que es aconsejable a la hora de establecer la relación entre NDVI y el *IAF* desestimar los días en los que tiene lugar eventos de lluvia.

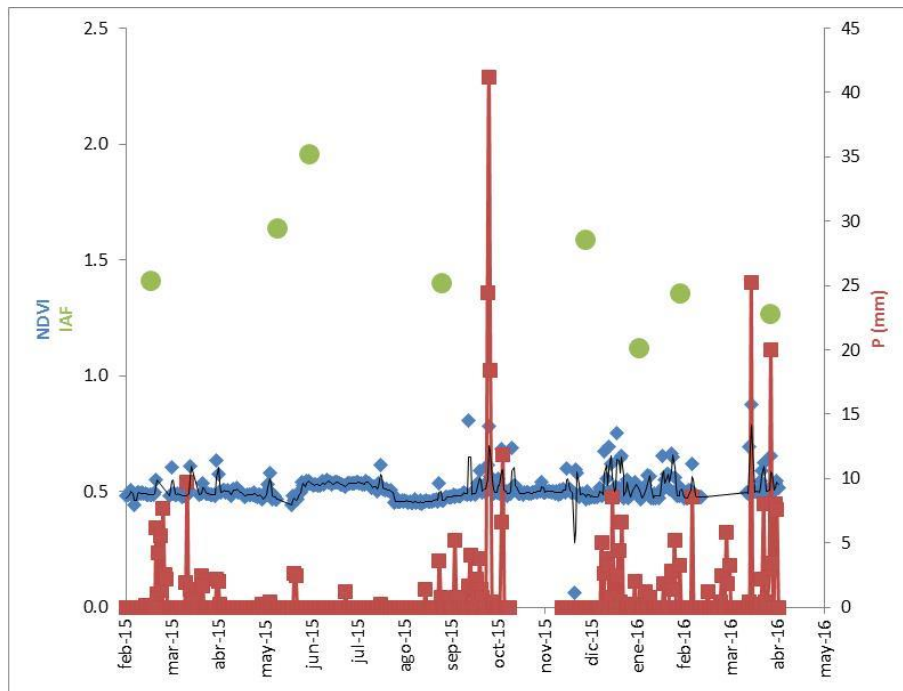


Figura 4.2.31. Valores de NDVI, IAF y P durante el periodo Febrero 2015-Abril 2016

4.2.6. Estudio de la influencia del dosel sobre la humedad del suelo.

Para caracterizar la influencia que ejerce el dosel sobre la humedad del suelo que se encuentra bajo el mismo, se ha llevado a cabo un estudio de la relación existente entre el incremento de humedad que se produce en la superficie situada bajo el dosel tras un evento de precipitación, comparado con el que se produce fuera de la zona de influencia del mismo. Los datos fueron obtenidos por los sensores de humedad instalados bajo los ejemplares de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*, tal como se detalla en el apartado 3.4.5.

El incremento de humedad del suelo observado bajo copa fue superior al observado fuera de ella, coincidiendo con los resultados obtenidos por Bhark y Small (2003), en el Suroeste de Estados Unidos analizando la infiltración bajo y fuera de copa de diferentes especies del género *Larrea*, y con los obtenido por Espejo-Pérez (2015), en la cuenca de Setenil de las Bodegas (Cádiz) en el suelo de una parcela con olivar de montaña. Se puede observar que los eventos de precipitación de más de 10 mm en el caso de la jara y de más de 5 mm en el caso del pino, causan un aumento de la humedad por debajo de la superficie del dosel mayor que el que se produce en el exterior (figura 4.2.32). Esto puede explicarse debido a que cuando los eventos de precipitación son pequeños la interceptación que se produce es muy alta, evitando que apenas llegue agua a la superficie del suelo situada bajo el mismo, como ya se vio en el apartado 4.1.

4. Resultados y discusión

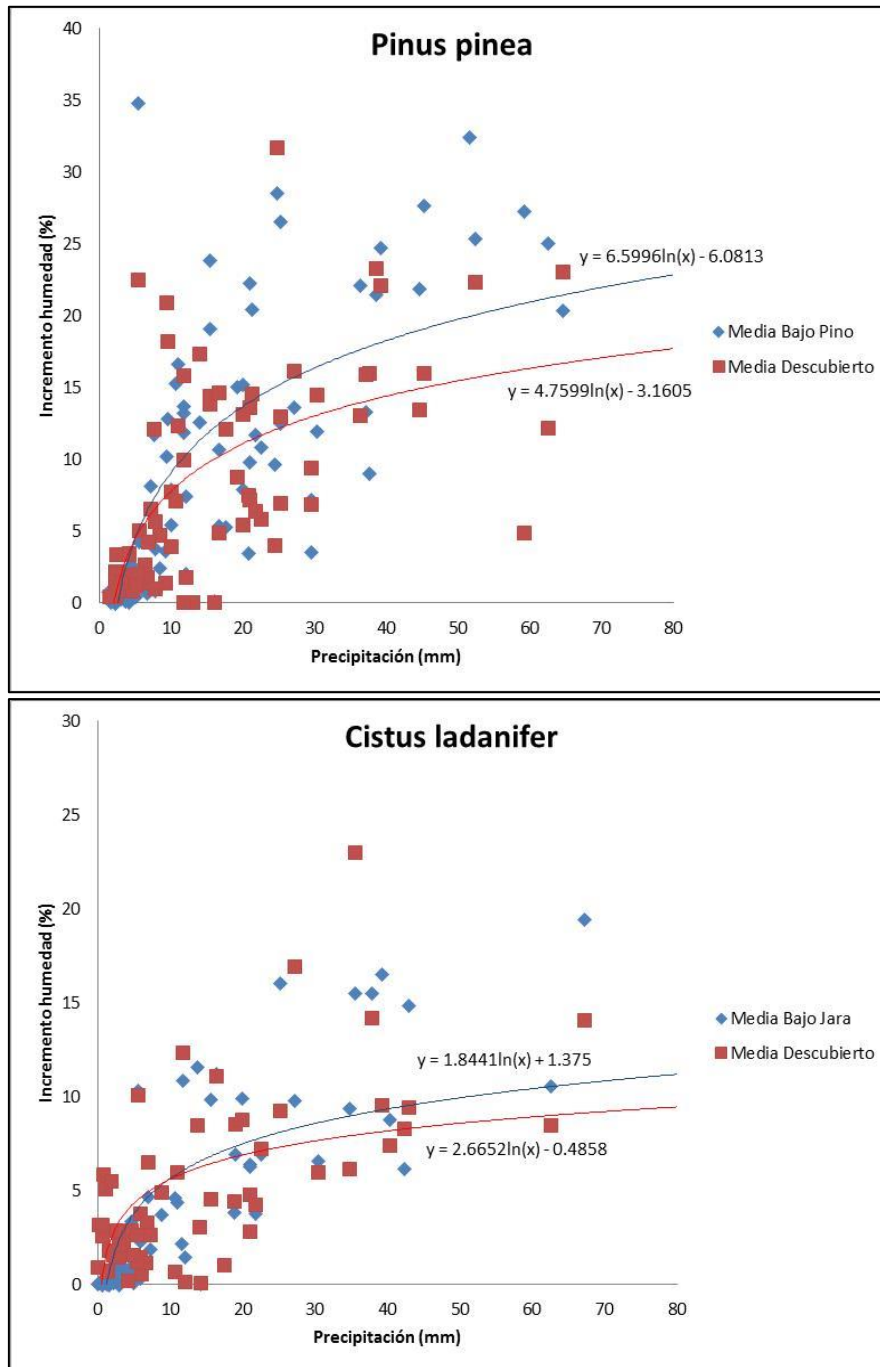


Figura 4.2.32. Incremento de la humedad del suelo para cada evento de precipitación en *Pinus pinea* (a) y *Cistus ladanifer* (b)

El contenido de agua del suelo es buen indicador del nexo entre la vegetación y la precipitación. Los datos del registro de dicha variable muestran una respuesta inmediata a la precipitación. Los registros de humedad revelaron que la zona cubierta por el dosel de ambas especies tiene una importante influencia en la dinámica del agua del suelo, favoreciendo la entrada de agua de lluvia con respecto a las zonas fuera de ellas, diferencia que puede explicarse por el efecto que ejerce la trascolación y el drenaje del dosel sobre estos suelos.

4.3. Modelos de interceptación

4.3.1. Estimación de parámetros

Como se mencionó en el punto 3.5.5, el primer paso para aplicar modelos de interceptación es obtener los coeficientes que intervienen en ellos. Éstos han sido determinados por métodos gráficos que consisten en representar la interceptación, la trascolación y la escorrentía cortical frente a la precipitación y en determinar la línea de regresión en cada caso.

Todos los parámetros fueron determinados a partir de los eventos individuales de precipitación durante todo el período de estudio. Debido al hecho de que las lecturas de campo podrían comprender más de un evento de lluvia y que hasta el año 2013 no se realizó un registro continuo, para el periodo comprendido entre Octubre de 2010 hasta Junio de 2013 sólo se tomaron en cuenta para el cálculo de los parámetros las medidas con uno o dos eventos de precipitación. En el caso de las medidas en las que tuvieron lugar dos eventos, la cantidad total de agua interceptada se dividió en proporción a la cantidad de precipitación incidente recogida en cada evento, el cual es un método de determinación aproximado (Lankreijer et al., 1993). Durante el período de Octubre de 2013 a Junio de 2015 se tiene disponible un registro continuo de las medidas de P , Tr y S_f en los árboles P_{M1} y P_{M2} .

Para comprobar la validez de los datos procedentes de los pluviómetros automáticos, se han comparado los tres métodos de medida de trascolación instalados en los ejemplares de *Pinus pinea* de la zona del Arroyo de los Morales (canaletas, pluviómetros manuales, pluviómetros automáticos), realizando 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.

Los datos de trascolación obtenidos 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 aplicó el test de Levene (Levene, 1960) utilizando el software “R

4. Resultados y discusión

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.

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 ejemplar P_{M1} (p-valor < 0.004739) ni en el ejemplar P_{M2} (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 P_{M1} y p-valor > 0.2338 en P_{M2}).

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 P_{M1} y p-valor = 0.9085 para P_{M2}), 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 P_{M1} ($F = 0.16$ y $gl = 2$, p-valor = 0.853), llegando a la misma conclusión en el caso del P_{M2} ($F = 0.071$ y $gl = 2$, p-valor = 0.931), ya que los dos individuos son similares y se encuentran cercanos. Este resultado permite afirmar que con 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, aunque la superficie de proyección de copa interceptada por cada uno de ellos es diferente (ver tabla 3.3). En consecuencia, puede decirse que tanto la disposición aleatoria de los pluviómetros manuales como la situación de los pluviómetros automáticos es bastante acertada.

Método de Saxena

Tal como se detalla en el apartado 3.5.5., con este método se han determinado los coeficientes de trascolación libre (p) y la capacidad de almacenamiento del dosel (S)

y la precipitación de saturación del dosel (P_s), a partir de la representación gráfica de la trascolación frente a la precipitación (Leyton et al., 1967; Gash y Morton, 1978), correspondiente a eventos de lluvia precedidos por al menos 10 horas sin lluvia en *Pinus pinea* y 5 horas en *Cistus ladanifer*, tiempo estimado para que se seque completamente el dosel (ver apartado 4.3.2).

El coeficiente S se determina como el valor de la trascolación cuando la precipitación incidente es nula para eventos que saturan el dosel, mientras p viene dado por la pendiente de la recta que se ajusta a los puntos representados para los eventos de lluvia insuficientes para saturar el dosel. Con una recta de pendiente 1:1 preestablecida, se graficó la precipitación incidente (P) contra el flujo de translocación (Tr) y se halló el punto de intersección (figura 4.3.1).

4. Resultados y discusión

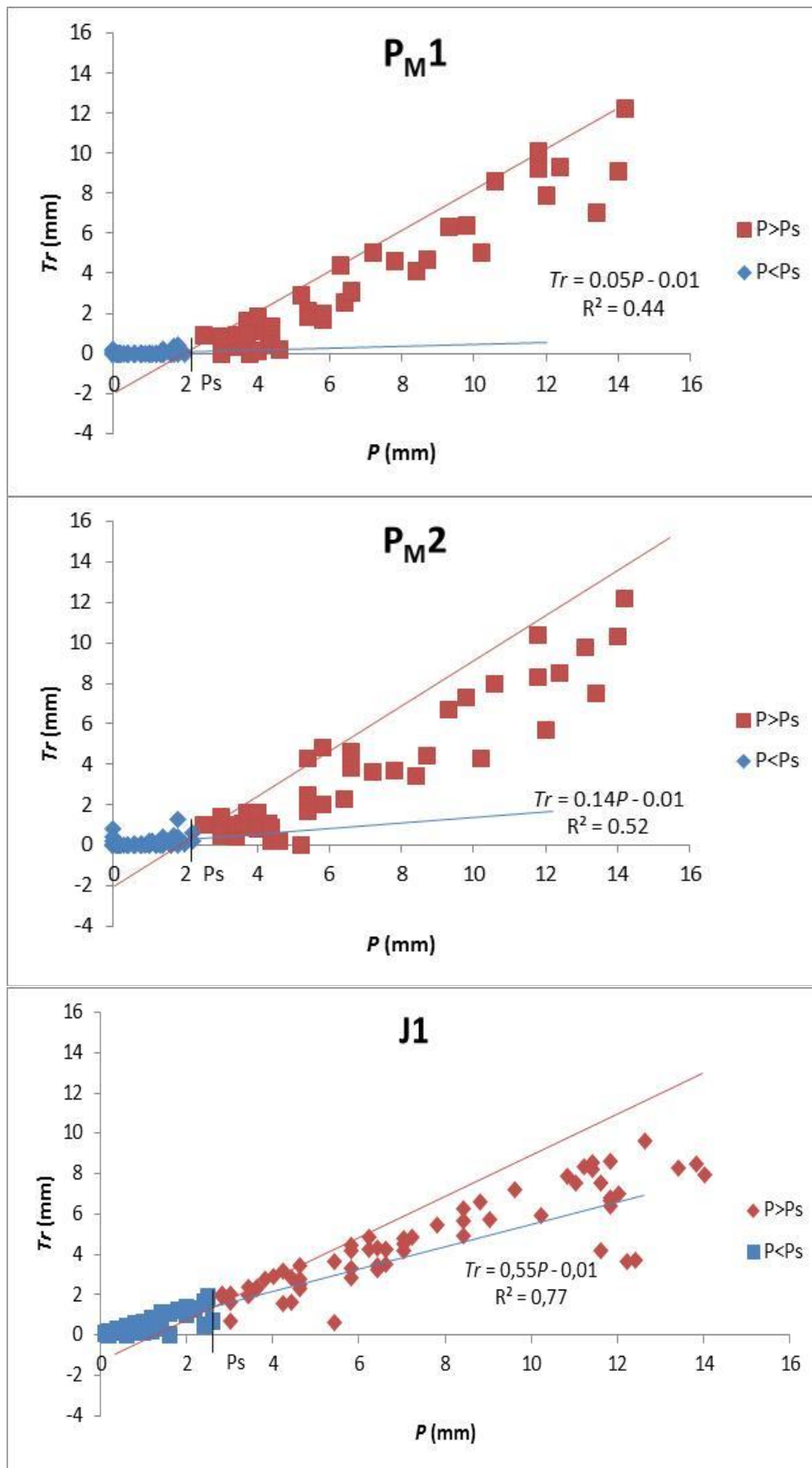


Figura 4.3.1. Relación entre Tr y P en *Pinus pinea* (P_{M1} y P_{M2}) y *Cistus ladanifer* (J1)

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Los parámetros hallados siguiendo esta metodología se muestran en la Tabla 4.3.1.

Tabla 4.3.1. Valores estimados de los parámetros por el método de Saxena para las especies *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

Ejemplar	Precipitación necesaria para saturar el dosel (P_s , mm)	Capacidad de almacenamiento (S , mm)	Coefficiente de trascolación libre (p)
<i>Pinus pinea</i> (P _{M1})	2,11	2,00	0,05
<i>Pinus pinea</i> (P _{M2})	2,23	2,00	0,14
<i>Cistus ladanifer</i> (J1)	2,32	1,00	0,55

Método de Klaassen

A diferencia del método anterior, con este método los coeficientes de trascolación libre (p), la capacidad de almacenamiento del dosel (S) y la precipitación de saturación del dosel (P_s) se obtienen a partir de la representación gráfica de la interceptación frente a la precipitación.

P_s se estima comúnmente a partir de la recta de regresión obtenida al representar I frente a P (Leyton et al., 1967). Como se ha visto en el apartado 3.5.5, en este trabajo se ha optado por seguir el procedimiento propuesto por Klaassen et al. (1998), representando gráficamente por separado los eventos en los que $P < P_s$ y los eventos en los que $P > P_s$ (figuras 4.3.2 y 4.3.3), variando P_s de forma que al aplicar las ecuaciones (3.19) y (3.20), se obtenga el mismo valor. Mediante esta iteración, además de P_s , se obtienen los parámetros S y p .

4. Resultados y discusión

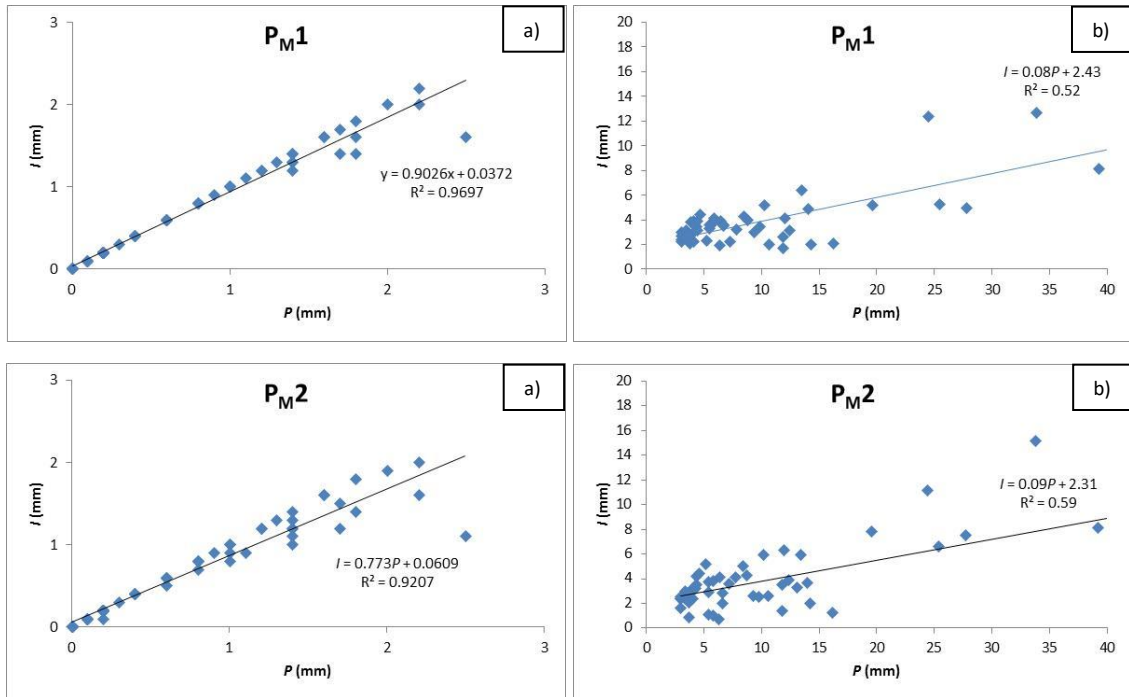


Figura 4.3.2. Relación entre I y P en *Pinus pinea* (P_{M1} y P_{M2}) para los eventos $P < P_s$ (a) y $P \geq P_s$ (b)

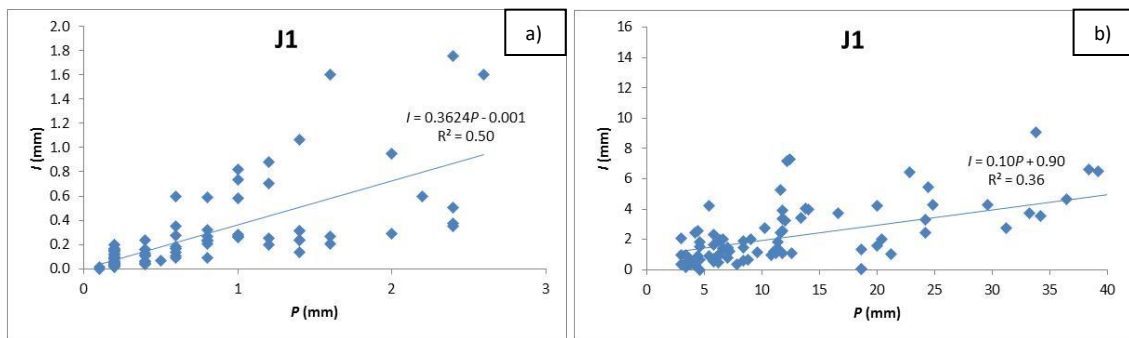


Figura 4.3.3. Relación entre I y P en *Cistus ladanifer* (J1) para los eventos $P < P_s$ (a) y $P \geq P_s$ (b)

Se observa que para eventos de lluvia pequeños, inferiores a la precipitación de saturación del dosel, los valores de R^2 son elevados, especialmente en los pinos, donde se obtienen valores de correlación superiores a 0,9, mientras que cuando los eventos de precipitación son mayores, existe una mayor dispersión en los datos. Efectivamente, hasta tanto la cantidad de precipitación depositada sobre la superficie foliar y las ramas no sobrepasa la capacidad máxima de retención de agua del dosel, toda el agua queda retenida en el mismo, mientras que cuando se producen lluvias que saturan el dosel, la variabilidad aumenta debido a que el agua que no puede ser interceptada comienza a caer hacia abajo como drenaje y, en algún caso, ser nuevamente interceptada por ramas y hojas situadas a cota inferior.

En la Tabla 4.3.2 se muestran los valores de los parámetros del modelo estimados de acuerdo a este procedimiento.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 4.3.2. Valores estimados de los parámetros por el método de Klassen para las especies *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

Ejemplar	Precipitación necesaria para saturar el dosel (P_s , mm)	Capacidad de almacenamiento (S , mm)	Coefficiente de trascolación libre (p)
<i>Pinus pinea</i> (P _{M1})	2,65	2,43	0,09
<i>Pinus pinea</i> (P _{M2})	2,55	2,31	0,21
<i>Cistus ladanifer</i> (J1)	2,60	0,90	0,64

Método de Gash

Como se vio en el apartado 3.5.5., a partir del modelo de Gash (Gash, 1979), se realiza una última estimación de la precipitación necesaria para saturar el dosel, tanto para la versión original del modelo, aplicando la ecuación 4.3.1, como para la versión modificada, utilizando en este caso la ecuación 4.3.2.

$$P_s = - \left(\frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \right) \ln \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (1 - p - p_t)^{-1} \right\} \quad (4.3.1)$$

$$P_s = - \frac{\bar{R}}{(1-\varepsilon)\bar{E}_c} \frac{S}{c} \ln \left\{ 1 - \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right\} \quad (4.3.2)$$

En la Tabla 4.3.3 se muestran los valores de los parámetros del modelo estimados de acuerdo a este procedimiento.

Tabla 4.3.3. Valores estimados de los parámetros por el método de Gash para las especies *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

Ejemplar	Precipitación necesaria para saturar el dosel (P_s , mm)
<i>Pinus pinea</i> (P _{M1})	3,06
<i>Pinus pinea</i> (P _{M2})	3,31
<i>Cistus ladanifer</i> (J1)	3,07

4. Resultados y discusión

Por otro lado, tal como se explicó en el apartado 3.5.5, los parámetros de escorrentía cortical utilizados en los modelos, S_t y p_t , se obtienen siguiendo la metodología de Leyton (1967), considerando únicamente aquellos eventos que precedidos de 24 horas sin lluvia no tienen escorrentía cortical nula.

Para los ejemplares de *Pinus pinea* la escorrentía cortical presentó una correlación de un 65% respecto a la precipitación incidente para el ejemplar P_{M1} y de un 73% para el ejemplar P_{M2} (Figura 4.3.4). El 65% de los datos explica la escorrentía cortical como función de la precipitación incidente, mostrando que para valores mayores a 10 mm de precipitación, la dispersión es mucho más significativa que para valores menores de precipitación incidente, debido a que, al igual que ocurría en el dosel, la variabilidad aumenta cuando se sobrepasa la capacidad de almacenamiento del fuste, mientras que para eventos de lluvia pequeños toda el agua queda retenida en el mismo.

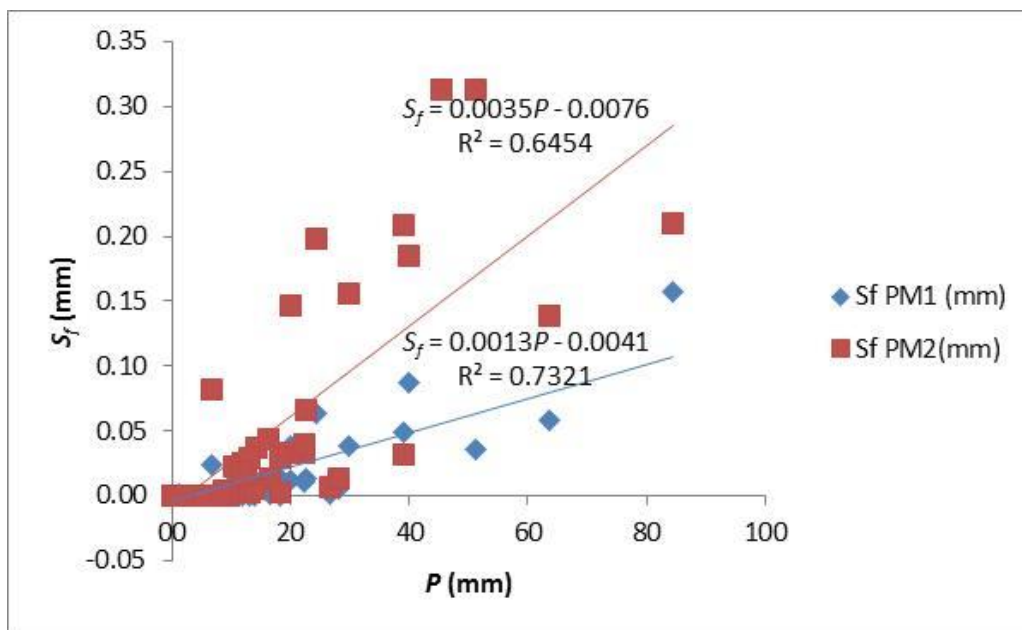


Figura 4.3.4. Relación entre S_f y P en *Pinus pinea* (P_{M1} y P_{M2})

Para el caso de *Cistus ladanifer*, se presentó una alta correlación (95%) entre el escurrimiento fustal y la precipitación incidente, mostrando una dispersión uniforme para todos los valores de la precipitación incidente (Figura 4.3.5).

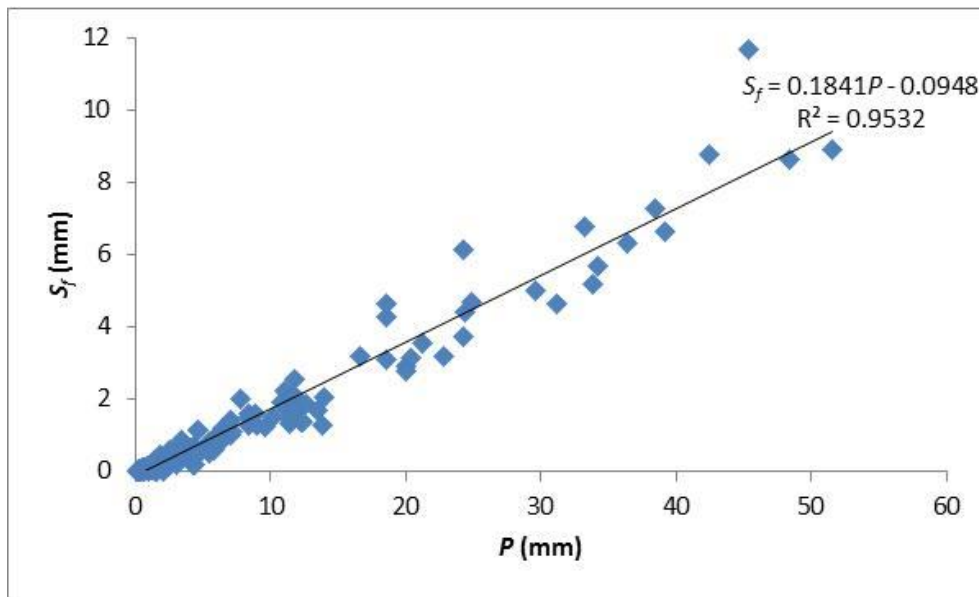


Figura 4.3.5. Relación entre S_f y P en *Cistus ladanifer* (J1)

El parámetro de escorrentía cortical para las versiones de los modelos en el caso de vegetación dispersa (p_d) se estimó a partir de la regresión lineal entre la escorrentía cortical y la expresión $(Tr - (1 - c)P)$, de acuerdo con el método descrito por Valente et al. (1997) (figuras 4.3.6 y 4.3.7). El valor del parámetro p_d se determina a partir del valor de la pendiente de la recta de regresión obtenida, aplicando la ecuación 4.3.3:

$$p_d = \frac{pte}{(1+pte)} \quad (4.3.3)$$

En el caso de los modelos originales el parámetro de capacidad de almacenamiento del dosel (S) está relacionado con un área de vegetación homogénea, caso contrario a los modelos modificados o *sparse*, donde esta característica se relaciona solo con el área cubierta por la vegetación, es decir, su valor se reduce en función de la cobertura vegetal (c).

En el modelo original de Rutter, la evaporación potencial de los troncos está afectada por un coeficiente de reducción (ε), cuyo valor fue hallado experimentalmente y oscila entre 1% y 5% (Rutter y Morton, 1977). ε es una constante adimensional que relaciona la evaporación desde los troncos con la existente en el dosel (ecuación 4.3.4):

$$\varepsilon = E_t/E_c \quad (4.3.4)$$

4. Resultados y discusión

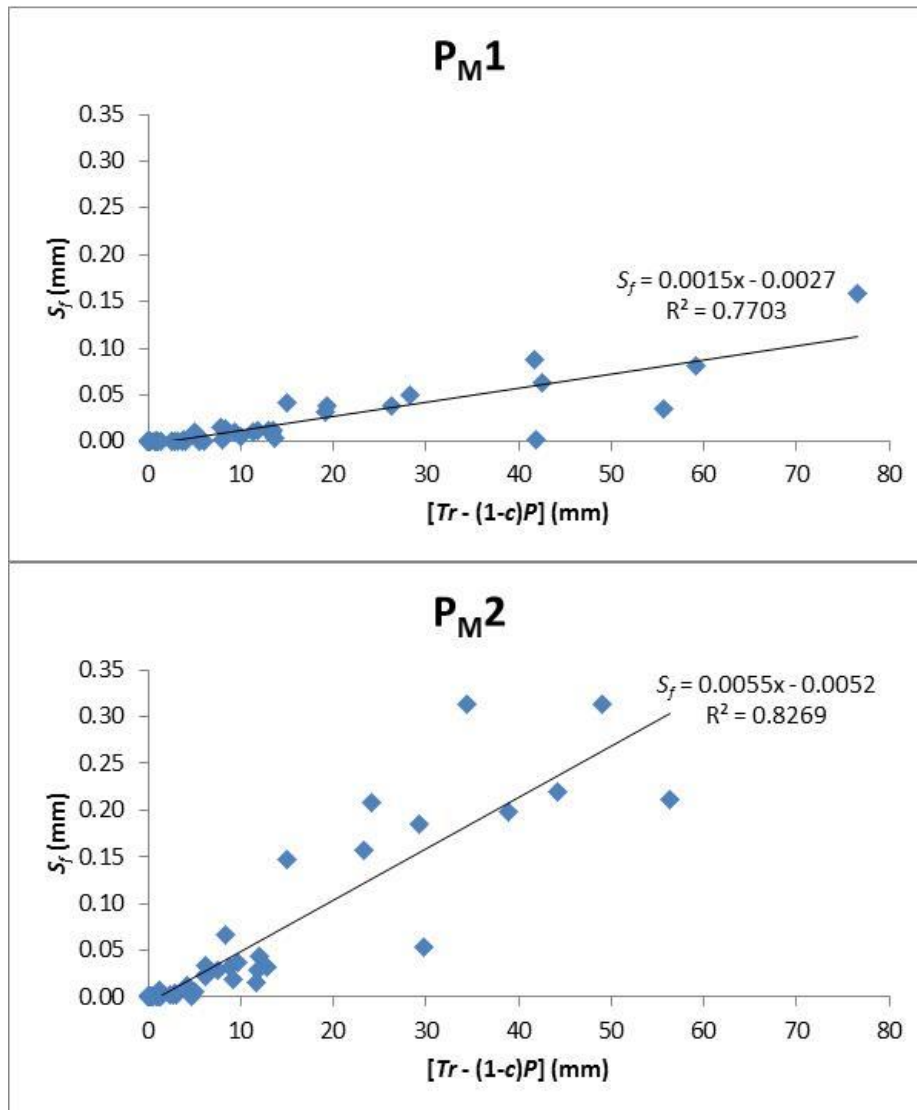


Figura 4.3.6. Relación entre S_f y $Tr-(1-c)P$ en *Pinus pinea* (P_{M1} y P_{M2})

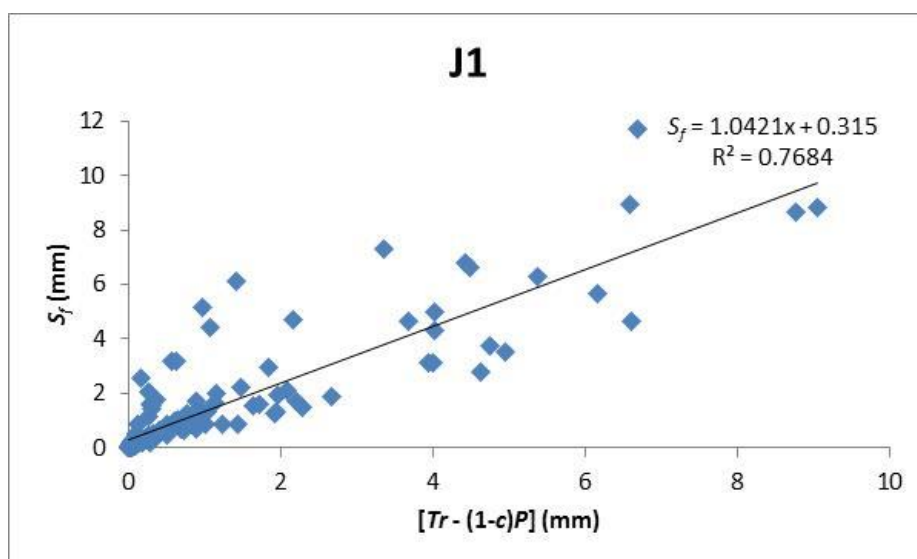


Figura 4.3.7. Relación entre S_f y $Tr-(1-c)P$ en *Cistus ladanifer* ($J1$)

Valente et al. (1997) introdujeron una modificación de los modelos originales de Rutter, asumiendo que la evaporación es nula en las áreas sin vegetación y que la evaporación desde el dosel se relaciona con la evaporación desde el fuste cuando el dosel está saturado, mediante la variable adimensional ε , siendo entonces la evaporación desde el dosel $(1 - \varepsilon) \cdot E$, y la evaporación desde el fuste, $\varepsilon \cdot E$.

En el caso del modelo de Rutter et al. (1971) el drenaje se calcula multiplicando una intensidad de goteo obtenida empíricamente por un coeficiente que relaciona la intensidad de drenaje con la capacidad de almacenamiento (ecuación 4.3.5), por lo que se precisan los parámetros de drenaje D_0 y b , que se utilizan en este modelo para describir el goteo del dosel:

$$D = D_0 e^{b(C-S)} \quad (4.3.5)$$

, donde D es la tasa de drenaje, D_0 la tasa de drenaje cuando $C=S$ (dosel saturado), y b es el coeficiente de drenaje. D tiende a cero cuando $C < S$, con esto se evita el problema de un drenaje finito cuando $C = 0$ (Calder, 1977). Los valores de estos parámetros se han obtenido en función de la capacidad de almacenamiento del dosel (S), tal como se explica en el apartado 3.5.5.

Los demás modelos identifican el drenaje como una parte integral del balance de agua en el dosel. El modelo de Rutter *sparse* (Valente et al., 1997) utiliza una formulación en la cual evita trabajar con parámetros empíricos. El cálculo se basa en las diferencias entre la máxima capacidad de almacenamiento (S) y el almacenamiento en el dosel (C). El drenaje en el modelo de Rutter et al. (1971), puede continuar hasta después que ha cesado la lluvia a diferencia de Rutter *sparse* donde el drenaje se interrumpe cuando cesa la lluvia.

En la Tabla 4.3.4 se muestran los valores de los parámetros de los modelos estimados de acuerdo con los procedimientos descritos anteriormente. En el caso de los parámetros P_s , p y S se ha tomado el valor medio de los resultados obtenidos en los diferentes métodos aplicados.

4. Resultados y discusión

Tabla 4.3.4. Valores estimados de los parámetros para las especies *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

Parámetro	<i>Pinus pinea</i> (P _{M1})	<i>Pinus pinea</i> (P _{M2})	<i>Cistus ladanifer</i> (I1)
<i>P_s</i> (mm)	2,61	2,70	2,66
<i>p</i>	0,07	0,17	0,62
<i>S</i> (mm)	2,37	2,21	0,84
<i>p_t</i>	0,001	0,004	0,18
<i>S_t</i> (mm)	0,004	0,008	0,09
<i>p_d</i>	0,001	0,005	0,51
<i>ε</i>	0,01	0,01	0,01
<i>D_o</i> (mm/min)	0,006	0,005	0,002
<i>b</i>	1,64	1,76	4,63

4.3.2. Independencia de eventos para la determinación de la intercepción. Tiempo de secado del dosel (CDT)

La intercepción fue determinada a través de la diferencia entre la precipitación incidente y la precipitación neta, aplicada para cada evento de precipitación. En el Capítulo 7 se muestran los datos de campo relativos a la redistribución de la precipitación en los eventos estudiados, incluyendo la precipitación incidente, la escorrentía cortical, la trascolación y la intercepción resultante en los individuos seleccionados.

Es necesario puntualizar que el factor continuidad en los eventos de precipitación es muy importante. Las tormentas de larga duración, por lo general tienen más periodos sin precipitación (evento discontinuo) y el dosel se satura o se seca según la discontinuidad de la lluvia, incrementando por este motivo las pérdidas por evaporación.

Una de las condiciones necesaria e imprescindible para el desarrollo experimental de este trabajo es que todos los eventos de lluvia fueran independientes. Esta es una de las hipótesis que se plantean en los modelos de interceptación que se aplicarán a continuación.

Tal como se define en el apartado 4.1.1, un evento de precipitación es aquella lluvia más o menos continua en el tiempo y separada de la siguiente por un periodo seco, suficiente como para que la cubierta vegetal se haya secado completamente. El tiempo de secado de dosel generalmente varía en función de la velocidad de evaporación después de la lluvia (Rutter et al, 1975; Gash, 1979). No hay ningún criterio estándar para establecer la duración del periodo de secado, pues depende en gran medida del clima y de los procesos naturales que afectan a las precipitaciones. Algunos autores han fijado este tiempo en 1 hora (Latron et al., 2003), 4 horas (Rodrigo y Ávila, 2001), 12 horas (Belmonte Serrato, 1997) o las 18 horas de Huber y Oyarzún (1984).

En nuestro caso, para estimar el tiempo de secado del dosel hemos aplicado en primer lugar el modelo de interceptación Rutter (Rutter et al., 1975), a partir de los datos climáticos horarios proporcionados por la estación meteorológica de El Cabril. Como se ha visto (apartado 3.5.1), el modelo se basa en un cálculo del balance hídrico en el dosel y en el tronco de la planta, y utiliza la precipitación incidente y la evaporación en el dosel y en el tronco para estimar la trascolación, la escorrentía cortical y la interceptación. La evaporación del dosel húmedo puede calcularse directamente a partir de la ecuación de la evaporación potencial de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Pereira et al., 2009). El tiempo de secado del dosel (*CDT*, h) se obtuvo mediante el cálculo del tiempo necesario para que el dosel se seque por completo después del final del evento de lluvia; dado que tenemos datos de precipitación y evaporación horarios, se sabe el momento en que la lluvia se detiene y el número de horas que se necesita hasta que, según el modelo, no queda agua almacenada en el dosel.

Aplicando el modelo Rutter en los individuos de *Pinus pinea*, se identificó un total de 393 eventos de precipitación con un tiempo medio de secado de 9,2 horas. El tiempo de secado obtenido para el dosel de *Cistus ladanifer* es de 4,4 horas, determinado en este caso partir de 299 eventos de lluvia. Para asegurar un secado completo del dosel, se ha establecido un periodo mínimo de 10 horas para que se

4. Resultados y discusión

evapore toda el agua almacenada en el dosel de *Pinus pinea* y 5 horas para *Cistus ladanifer*.

Nuestros resultados muestran que el tiempo de secado del dosel varía de una especie a otra, siendo más del doble en *Pinus pinea* que en *Cistus ladanifer*, lo cual tiene sentido teniendo en cuenta la diferencia entre la estructura de la cubierta de ambas especies, que es mucho mayor en los árboles de *Pinus pinea*.

Según estos valores de *CDT* obtenidos, se puede afirmar que la metodología seguida para la toma de medidas de trascolación y escorrentía cortical es adecuada (ver apartado 3.3), puesto que al día siguiente de que finalice la lluvia toda el agua de trascolación y escorrentía cortical ha sido recogida ya por los diferentes depósitos.

En segundo lugar, los sensores de humedad con forma de hoja (Dielectric Leaf Wetness Sensor, LWS) instalados en los ejemplares P_{M1} y P_{M2} se utilizaron para estimar el tiempo de secado del dosel en *Pinus pinea* (ver apartado 3.4.4). Esta información se ha utilizado para validar el modelo de interceptación Rutter, ya que incluyendo el tiempo de secado del dosel como parte de los datos de validación se puede causar una mejora en la estimación de interceptación.

Con los datos disponibles obtenidos de los sensores de humedad instalados en los ejemplares de *Pinus pinea*, se ha podido calcular el tiempo de secado del dosel para cada evento de lluvia (figura 4.3.8), que se ha definido como el tiempo desde el cese de la lluvia hasta el momento en el que el sensor determina la ausencia de humedad en la superficie de la hoja. Se disponen de los datos recogidos por los sensores LWS durante el año de 2015, período en el que se identificaron 64 eventos de lluvia.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

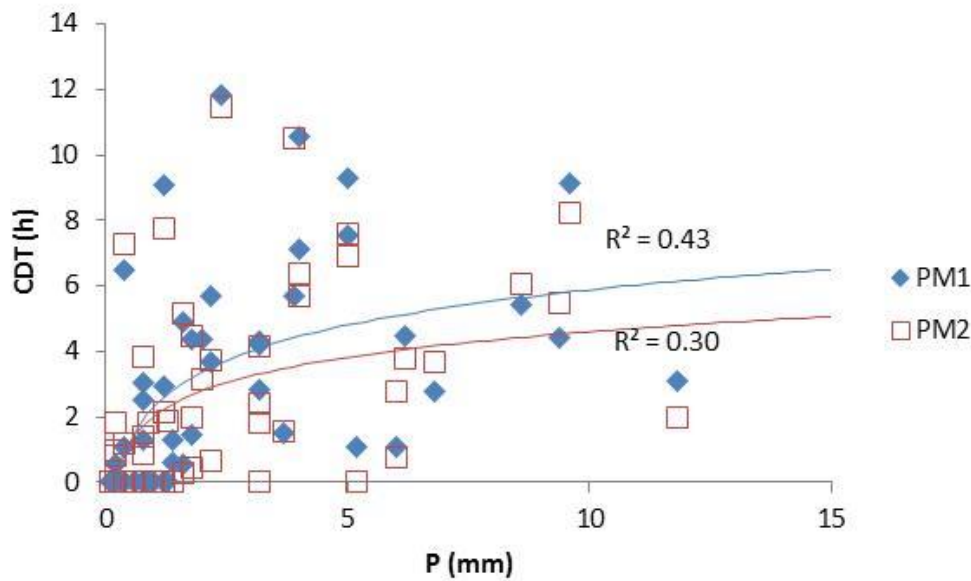


Figura 4.3.8. Relación entre los valores de *CDT* obtenidos por los sensores LWS y *P* en *Pinus pinea*

Aunque los valores de R^2 obtenidos son bajos, se observa que las tendencias son muy claras en ambos árboles, de forma que *CDT* aumenta cuando la precipitación es mayor.

Los valores de tiempo de secado dosel estimados de la simulación con el modelo de Rutter se compararon con los obtenidos por los sensores y los resultados muestran que el modelo sobreestima los valores de *CDT*, especialmente cuando la lluvia era pequeña (figura 4.3.9).

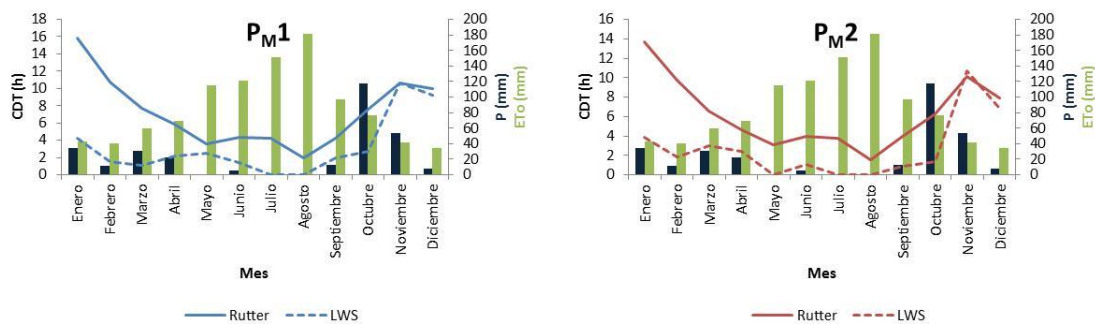


Figura 4.3.9. Valores mensuales de *CDT* obtenidos por los sensores LWS y por el modelo de Rutter en *Pinus pinea*

Los resultados sugieren que el modelo Rutter, aunque sobreestima valores de *CDT*, representa la evolución temporal del tiempo de secado del dosel de acuerdo con los valores obtenidos por los sensores. En la figura 4.3.8 se observa como varía el *CDT* a lo largo del año, siendo la duración necesaria para que se seque el dosel en los meses

4. Resultados y discusión

de verano bastante menor que en los meses de invierno como era de esperar ya que la evaporación es mayor.

Se ha analizado la variación de los valores de *CDT* obtenidos con el modelo de Rutter para diferentes condiciones climáticas, como por ejemplo la cantidad de precipitación (figura 4.3.10) y la evaporación potencial (figura 4.3.11).

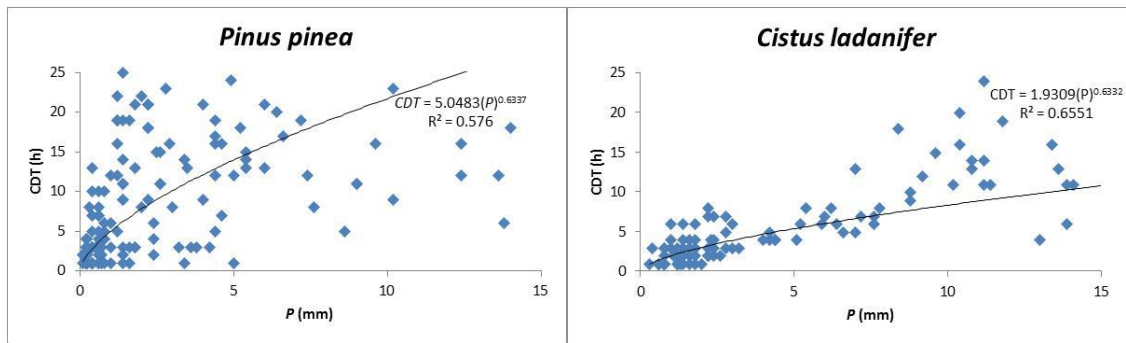


Figura 4.3.10. Correlación entre los valores de *CDT* obtenidos con el modelo de Rutter y la precipitación

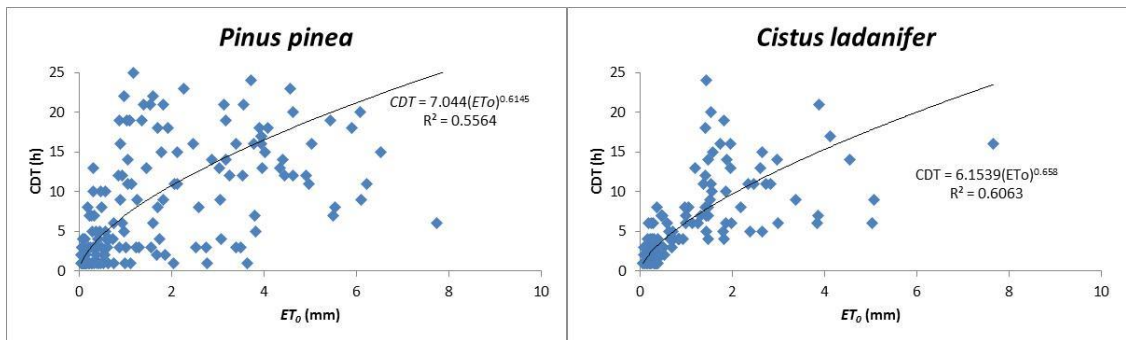


Figura 4.3.11. Correlación entre los valores de *CDT* obtenidos con el modelo de Rutter y la evaporación

Como era de esperar, en ambas especies se observa que el tiempo de secado del dosel está relacionado directamente con la cantidad de precipitación que acontece en cada evento y con la intensidad de evaporación que tiene lugar después de que finaliza la lluvia (Gash, 1979).

Tal como se observa en la tabla 4.3.5, los valores de *CDT* son mayores en otoño e invierno, cuando se produce más precipitación y la velocidad de evaporación es menor, mientras que en primavera y verano, cuando la cantidad de lluvia disminuye y la intensidad de evaporación aumenta, los valores *CDT* son menores.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 4.3.5. Valores estacionales de *CDT* obtenidos por los sensores LWS y estimados por el modelo de Rutter en *Pinus pinea*

	Sensores		Modelo de Rutter	
	CDT P _M 1 (h)	CDT P _M 2 (h)	CDT P _M 1 (h)	CDT P _M 2 (h)
Invierno	4,1	4,2	9,0	8,0
Primavera	1,6	1,5	5,0	4,3
Verano	2,8	1,6	4,1	3,7
Otoño	3,2	2,1	11,4	9,4

Por otra parte, se ha estudiado el efecto que tiene la hora de finalización de la lluvia en el *CDT*. Para esto, los eventos de lluvia se dividen en dos tipos: cuando la lluvia cesa durante el día (desde las 6 a.m. hasta las 6 p.m.) y cuando la precipitación termina durante la noche (desde las 6 p.m. hasta las 6 a.m.).

Los valores de *CDT* están ampliamente distribuidos, siendo mayor el tiempo de secado cuando la lluvia finaliza durante la noche y disminuyendo si la lluvia cesa durante el día (figura 4.3.12). Esta variación de los valores de *CDT* se debe al aumento de la radiación neta y a la demanda por evaporación durante las horas del día.

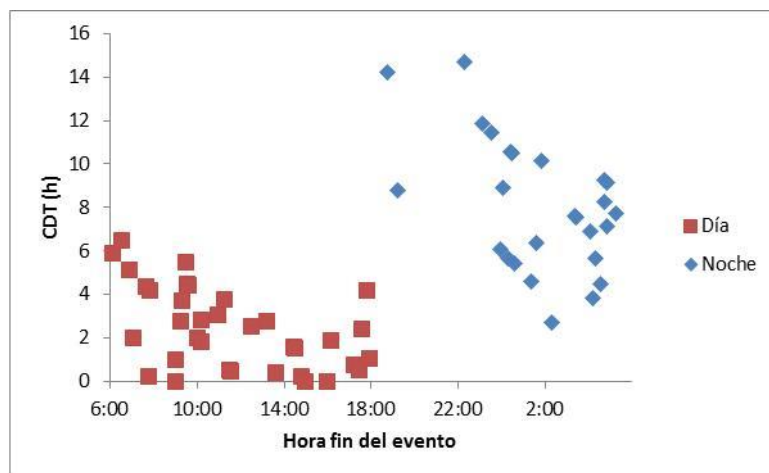


Figura 4.3.12. Valores de *CDT* obtenidos por los sensores LWS en función de la hora en la que finaliza el evento de precipitación en *Pinus pinea*

4.3.3. Modelación de la interceptación

Para efectos tanto de comparación de modelos como de validación de los mismos se trabajó con las 37 tormentas identificadas y analizadas en *Pinus pinea* desde que se inició la toma de datos continuos con los pluviómetros automáticos, ya que, en este caso, se conoce la trascolación y la escorrentía cortical correspondiente a cada evento de lluvia. Estos eventos se registraron en el periodo comprendido entre el 9 de Octubre de 2013 y el 23 de Junio de 2015. En el caso de *Cistus ladanifer* al no disponer

4. Resultados y discusión

de medidas continuas se ha trabajado con los 66 registros disponibles en la planta J1 en todo el periodo de toma de datos. En este supuesto cada evento se corresponde con el intervalo entre medidas.

Las comparaciones entre modelos y medidas de validación se encuentran en la tabla 4.3.6. En la primera columna se presenta el modelo de interceptación aplicado para su estimación, y se continúa con las variables hidrológicas analizadas (T_r , S_f , I). La quinta columna muestra el porcentaje de interceptación durante el periodo de análisis. En la tabla se puede observar que los valores de interceptación obtenidos usando los modelos son inferiores a los medidos en campo, exceptuando el caso del ejemplar *Pinus pinea* P_{M1}, donde aplicando el modelo de Rutter se obtiene un valor de interceptación superior al medido experimentalmente.

Tabla 4.3.6. Comparación de los modelos de interceptación de lluvia en los diferentes ejemplares estudiados.

<i>Pinus pinea</i> (P _{M1})	T_r (mm)	S_f (mm)	I (mm)	I/P_g (%)
Experimental	534,7	0,9	238,1	30,8
Rutter (1975)	525,9	0,9	246,9	31,9
Rutter mod. Valente (1997)	537,1	0,6	236	30,5
Gash (1979)	538,9	0,6	234,2	30,3
Gash mod. Valente (1997)	538,9	0,5	234,3	30,3

<i>Pinus pinea</i> (P _{M2})	T_r (mm)	S_f (mm)	I (mm)	I/P_g (%)
Experimental	520,7	2,3	250,7	32,4
Rutter (1975)	539,8	2,6	231,3	29,9
Rutter mod. Valente (1997)	554,1	2,2	217,4	28,1
Gash (1979)	557,2	1,9	214,5	27,7
Gash mod. Valente (1997)	557,5	1,9	214,4	27,7

<i>Cistus ladanifer</i> (J1)	T_r (mm)	S_f (mm)	I (mm)	I/P_g (%)
Experimental	1116,3	276,5	259,8	15,7
Rutter (1975)	1125,3	303,5	224,1	13,6
Rutter mod. Valente (1997)	1370,4	83,2	198,9	12,0
Gash (1979)	1143,3	278,8	230,4	13,9
Gash mod. Valente (1997)	1418,1	84,1	150,3	9,1

Los resultados muestran que cuando se reformulan los modelos originales con las modificaciones introducidas por Valente para explicar la naturaleza dispersa de los bosques, disminuye la interceptación simulada respecto a las versiones originales de los modelos, debido a que no tienen en cuenta que la zona de evaporación real (dosel + troncos) es más reducida en los bosques dispersos. Como en este estudio las versiones originales han subestimado las pérdidas de interceptación, exceptuando, como ya se ha dicho, el modelo de Rutter en el ejemplar P_{M1}, al simular con las versiones modificadas por Valente, los resultados han sido peores que los obtenidos con los modelos originales.

4.3.4. Validación de modelos de interceptación de lluvia

Con los resultados obtenidos de los modelos se procedió a realizar una comparación entre las salidas de los mismos con los valores experimentales obtenidos en campo. Se estimó la diferencia entre los porcentajes acumulados de cada una de las variables simuladas con los registrados durante el periodo de estudio (tabla 4.3.7).

Tabla 4.3.7. Comparación de cada una de las variables simuladas por los modelos de interceptación con los valores registrados (%) en los diferentes ejemplares estudiados.

Ejemplar	Modelo	$Tr_{obs} - Tr_{sim}$	$Sf_{obs} - Sf_{sim}$	$I_{obs} - I_{sim}$
P _{M1}	Rutter (1975)	1,1	0	-1,1
	Rutter sparse (1997)	-0,3	0	0,3
	Gash (1979)	-0,5	0	0,5
	Gash sparse (1997)	-0,5	0	0,5
P _{M2}	Rutter (1975)	-2,5	0	2,5
	Rutter sparse (1997)	-4,3	0	4,3
	Gash (1979)	-4,7	0	4,7
	Gash sparse (1997)	-4,7	0,1	4,7
J1	Rutter (1975)	-1,6	-1,1	2,2
	Rutter sparse (1997)	-15,4	11,7	3,7
	Gash (1979)	-1,6	-0,1	1,8
	Gash sparse (1997)	-18,3	11,6	6,6

4. Resultados y discusión

De manera complementaria a la validación de los modelos, se estudiaron las proporciones de cada variable respecto la precipitación incidente. Con estos porcentajes se procedió a calcular su valor medio, desviación estándar, máximo y mínimos (Tablas 4.3.7 y 4.3.8).

Tabla 4.3.8. Estadísticos de las variables hidrológicas analizadas en función de la precipitación incidente en *Pinus pinea* ($P_{M1} - P_{M2}$).

Variable	Modelo	Media (%)	Desviación estándar	Máxima (%)	Mínima (%)
Tr	Experimento	69,1 – 67,3	13,7 – 12,8	93,7 – 88,1	0 – 0
	Rutter (1975)	68 – 69,8	13,8 – 13,6	90,2 – 90,6	0 – 0
	Rutter sparse (1997)	69,4 – 71,6	13,6 – 13,5	90,7 – 91,1	0 - 0
	Gash (1979)	69,6 – 72	13 – 12,9	91,4 – 91,8	7 – 17,4
	Gash sparse (1997)	69,7 – 72	13 – 13,0	91,4 – 91,8	7,1 – 17,8
S_f	Experimento	0,1 – 0,3	0 – 0,1	0,2 -0,7	0 – 0
	Rutter (1975)	0,1 – 0,3	0 – 0,1	0,1 – 0,4	0,1 – 0,3
	Rutter sparse (1997)	0,1 – 0,3	0 – 0,1	0,1 – 0,4	0 - 0
	Gash (1979)	0,1 – 0,3	0 – 0	0,1 – 0,3	0 - 0
	Gash sparse (1997)	0,1 – 0,2	0 – 0,1	0,1 – 0,4	0 - 0
I	Experimento	30,8 – 32,4	4,7 – 5,7	100 – 100	6 – 11,8
	Rutter (1975)	31,9 – 29,9	3,6 – 3,6	99,9 -100	9,7 - 9
	Rutter sparse (1997)	30,5 – 28,1	3,8 – 3,7	100 – 100	9,1 – 8,4
	Gash (1979)	30,3 – 27,7	4,1 – 3,9	93 – 82,6	8,5 – 7,9
	Gash sparse (1997)	30,3 – 27,7	4,1 – 3,9	92,9 – 82,2	8,5 – 7,8

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 4.3.9. Estadísticos de las variables hidrológicas analizadas en función de la precipitación incidente en *Cistus ladanifer* (J1).

Variable	Modelo	Medida (%)	Desviación estándar	Máxima (%)	Mínima (%)
Tr	Experimento	67,5	12,9	83	0
	Rutter (1975)	68,1	12,4	100	49,9
	Rutter sparse (1997)	82,9	15,3	88,6	0
	Gash (1979)	69,2	12,4	80,2	32
	Gash sparse (1997)	85,8	15,1	88,9	80,6
S_f	Experimento	16,7	3,4	25,7	0
	Rutter (1975)	18,4	3,2	30,5	12,3
	Rutter sparse (1997)	5	1,2	8,3	0
	Gash (1979)	16,9	3,1	17,9	8,3
	Gash sparse (1997)	5,1	1,2	8,3	0
I	Experimento	15,7	3,1	100	0
	Rutter (1975)	13,6	2,1	100	3,5
	Rutter sparse (1997)	12	1,7	87,9	3,1
	Gash (1979)	13,9	2,4	52,7	3,7
	Gash sparse (1997)	9,1	1,4	19,4	2,8

En la primera columna se presenta la variable hidrológica analizada, seguido por el escenario o modelo aplicado para su estimación. Se continúa con la columna de porcentaje de precipitación incidente, que expresa el porcentaje de la variable analizada respecto la precipitación incidente acumulada. La cuarta columna es la desviación

4. Resultados y discusión

estándar de las variables. Las siguientes columnas expresan los valores máximo y mínimos obtenidos para el periodo de estudio.

Los modelos representan la tendencia de los valores registrados, lo que indica que la estructura matemática está de acuerdo con la naturaleza del proceso. Al comparar los porcentajes registrados con los estimados, se observa que los modelos originales presentan mejores ajustes que los modelos modificados para vegetación dispersa (Pérez Arellano et al., 2016).

Buscando evaluar la eficiencia de los modelos y procurando identificar cuál es el que tiene un mejor ajuste con los registros experimentales, se calcularon los estadísticos *RMSE*, *RMSEN* y *E* (ver apartado 3.5.7), relacionando los valores observados y simulados de la interceptación. Los resultados se consignan en la tabla 4.3.10.

Tabla 4.3.10. Relaciones estadísticas entre valores observados y simulados de interceptación.

Ejemplar	Modelo	<i>RMSE</i>	<i>RMSEN</i>	<i>E</i>
P_{M1}	Rutter (1975)	2,13	0,33	0,78
	Rutter sparse (1997)	2,06	0,32	0,70
	Gash (1979)	2,52	0,39	0,60
	Gash sparse (1997)	2,5	0,39	0,61
P_{M2}	Rutter (1975)	2,19	0,32	0,78
	Rutter sparse (1997)	2,26	0,33	0,59
	Gash (1979)	2,37	0,35	0,61
	Gash sparse (1997)	2,37	0,35	0,61
J1	Rutter (1975)	1,45	0,46	0,58
	Rutter sparse (1997)	2,99	0,95	-0,69
	Gash (1979)	1,58	0,5	0,60
	Gash sparse (1997)	2,90	0,92	-0,59

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

En los errores cuadráticos medios normalizados no se observan diferencias significativas entre los comportamientos de los modelos, a excepción de los valores obtenidos para el individuo J1, donde existe una gran diferencia entre los modelos originales y los modificados para vegetación dispersa, por lo que se puede descartar la aplicabilidad de estos últimos para *Cistus ladanifer*.

El modelo físico de Rutter ha sido el que mejor ajuste ha presentado en ambos ejemplares de *Pinus pinea*, obteniéndose un valor del coeficiente de eficiencia superior a 0,75 en los dos árboles. El modelo analítico de Gash en su versión original es que mejor se ha ajustado en el caso de *Cistus ladanifer* (J1), con la menor diferencia entre la interceptación acumulada registrada y la simulada, y un valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto.

Teniendo en cuenta los resultados de la comparación entre los modelos de interceptación de lluvia que fueron implementados, se construyeron regresiones lineales entre los valores observados y los estimados de la simulación del modelo interceptación que mejor se ha ajustado en cada caso (Tabla 4.3.11). Un valor de 1 en el coeficiente de determinación (R^2) indica una fuerte relación entre las dos variables aleatorias y verifica que las diferencias entre los valores registrados y simulados son mínimas.

Tabla 4.3.11. Coeficientes de regresión lineal entre valores observados y simulados para modelos de interceptación de lluvias

Ejemplar	Modelo	Pendiente	Intercepto	R^2
<i>Pinus pinea</i> P _M 1	Rutter (1975)	0,82	1,25	0,95
<i>Pinus pinea</i> P _M 2	Rutter (1975)	0,76	1,46	0,93
<i>Cistus ladanifer</i> J1	Gash (1979)	0,88	0,41	0,67

Los resultados gráficos de la validación de los modelos de Rutter original en *Pinus pinea* y de Gash original en *Cistus ladanifer* se muestran en la figura 4.3.13.

4. Resultados y discusión

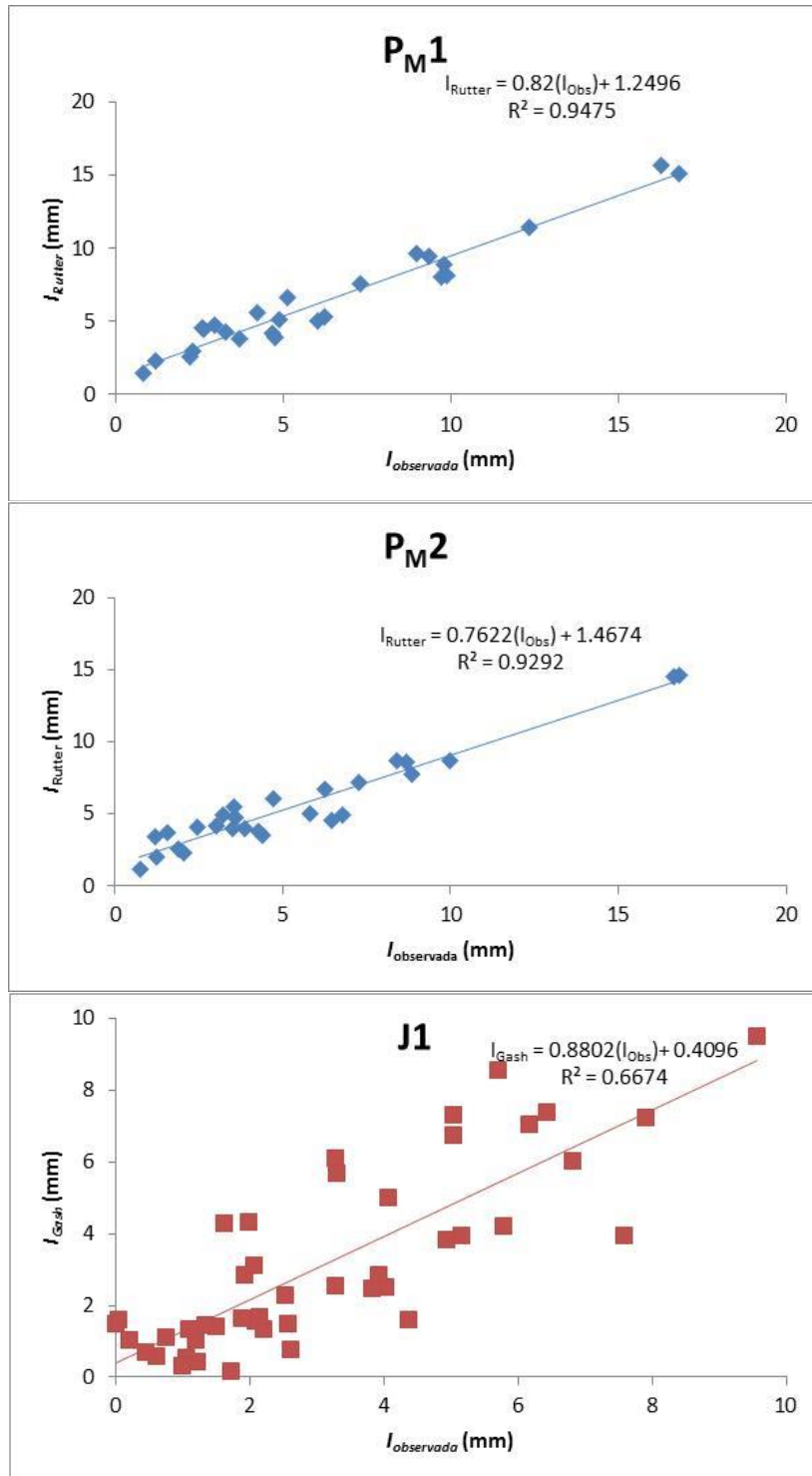


Figura 4.3.13. Interceptación calculada mediante modelos frente a la interceptación observada en los ejemplares estudiados.

Resultado de la regresión lineal entre los valores registrados y simulados se obtuvieron coeficientes de determinación que presentan un buen ajuste, lo que indica que los modelos son capaces de simular el proceso de interceptación de lluvias por coberturas vegetales.

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

El modelo de Rutter es el que mejor se ajusta a los valores de interceptación medidos en campo en los individuos de *Pinus pinea*. Los resultados de este modelo indican una buena correlación entre los valores de interceptación modelados y los experimentales. En el caso de *Cistus ladanifer*, el ajuste que presenta el modelo de Gash no es tan bueno, teniendo en general un mejor funcionamiento con precipitaciones menores a 2 mm. A medida que aumenta la cantidad de lluvia el modelo muestra una menor eficiencia en el cálculo de la interceptación.

En la figura 4.3.14 se presentan los valores acumulados de los eventos calculados con los modelos que mejor se han ajustado en cada caso.

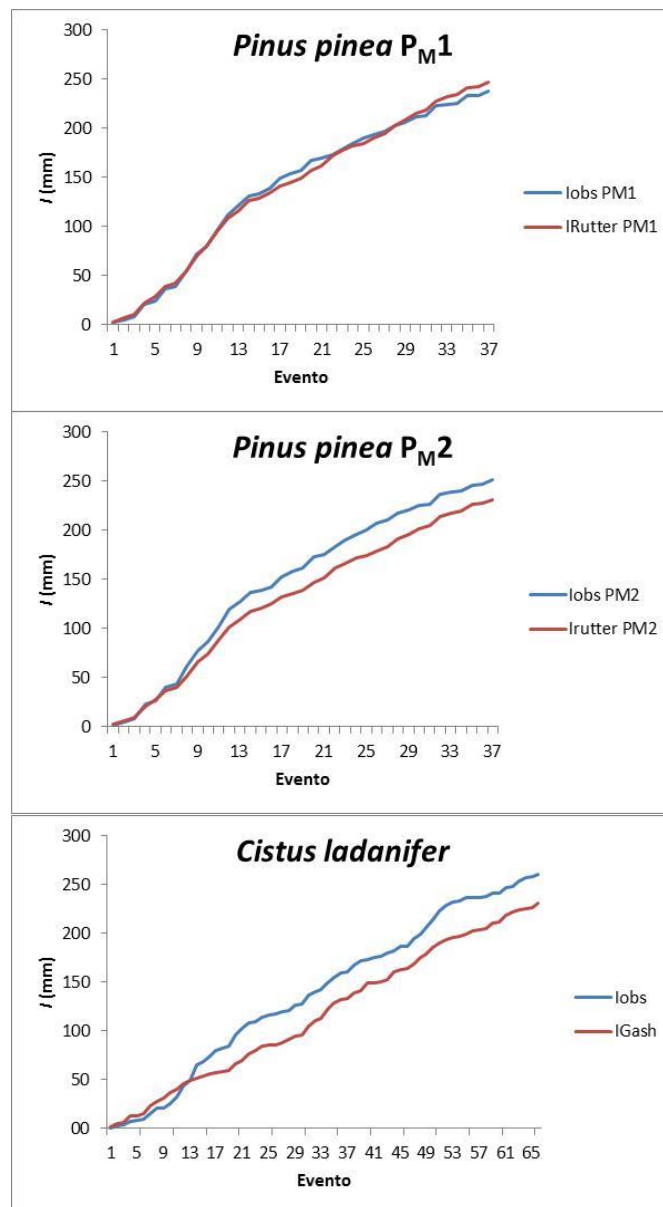


Figura 4.3.14. Interceptación acumulada para valores registrados y simulados

4. Resultados y discusión

Tal como se observa en la figura 4.3.14, el modelo de Rutter, sobrestima ligeramente la interceptación que tiene lugar en *Pinus pinea* P_{M1}, mientras que en el individuo P_{M2}, es el que mejor ajuste presenta a pesar de subestimar las pérdidas de interceptación en un 2,5% (tabla 4.3.6). El modelo de Gash en su versión original el que mejor se ajusta a los valores de interceptación observados en *Cistus ladanifer*, con la menor diferencia entre la interceptación acumulada registrada y la simulada (29,4 mm), seguida del modelo de Rutter, el cual también realiza una representación adecuada del proceso de interceptación de lluvias, con una subestimación de tan solo el 2,1%.

Finalmente, se ha realizado un análisis de sensibilidad (Rojas et al., 1996) de las variables implícitas en los modelos de interceptación con el que será posible determinar qué parámetros del modelo que mejor se ha ajustado a cada una de la 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 (p_t) y el parámetro de la intensidad 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 4.3.15a). En el caso de la jara, se realizó el análisis de sensibilidad a las mismas variables en el modelo de Gash, exceptuando la intensidad 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 4.3.15b).

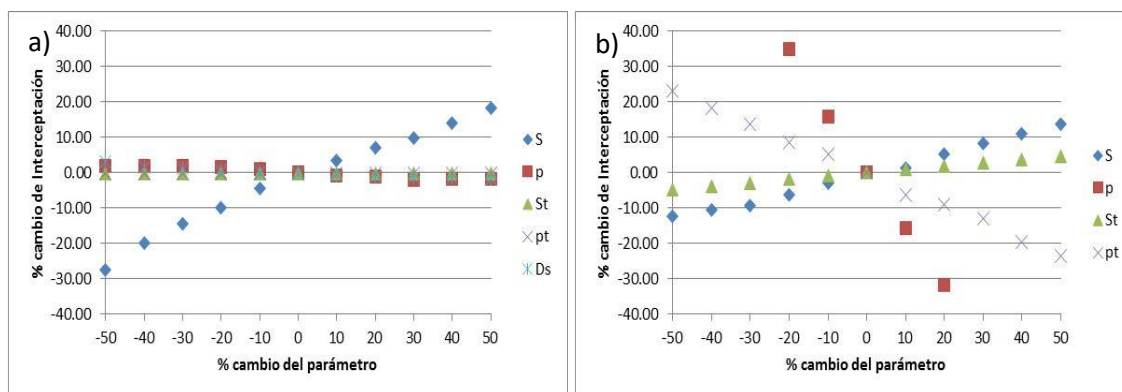


Figura 4.3.15. Sensibilidad de la interceptación a diferentes parámetros del modelo de Rutter original en *Pinus pinea* (a) y del modelo de Gash original en *Cistus ladanifer* (b).

La estimación de las pérdidas por interceptación de los modelos en nuestro estudio son atribuidas principalmente al coeficiente de flujo de traslocación (p) en el modelo de Gash y, en el modelo de Rutter, a la capacidad de almacenamiento del dosel (S).

Para *Pinus pinea* los resultados muestran que para ambos individuos existe una gran sensibilidad con respecto al parámetro S : una disminución del 50% de S reduce en casi un 30% las pérdidas por interceptación, para el modelo de Rutter. En tanto para *Cistus ladanifer* un aumento del parámetro p del 20% produce una disminución superior al 30% de la interceptación, para el modelo de Gash. Por último, los modelos presentan una baja sensibilidad a los parámetros asociados a los troncos, p_t y S_t , ya que tienen una pequeña contribución al total de la pérdida por interceptación.

4.3.5. Simulación del proceso de interceptación de lluvia

Para esta simulación se contó con información diaria de las variables precipitación, temperatura media, mínima y máxima, humedad relativa y radiación solar durante el año 2014. Se aplicó la ecuación de Penman Monteith y se obtuvo los valores de evaporación potencial diaria.

En la Figura 4.3.16 se muestran los valores de evaporación y precipitación diaria para el año 2014.

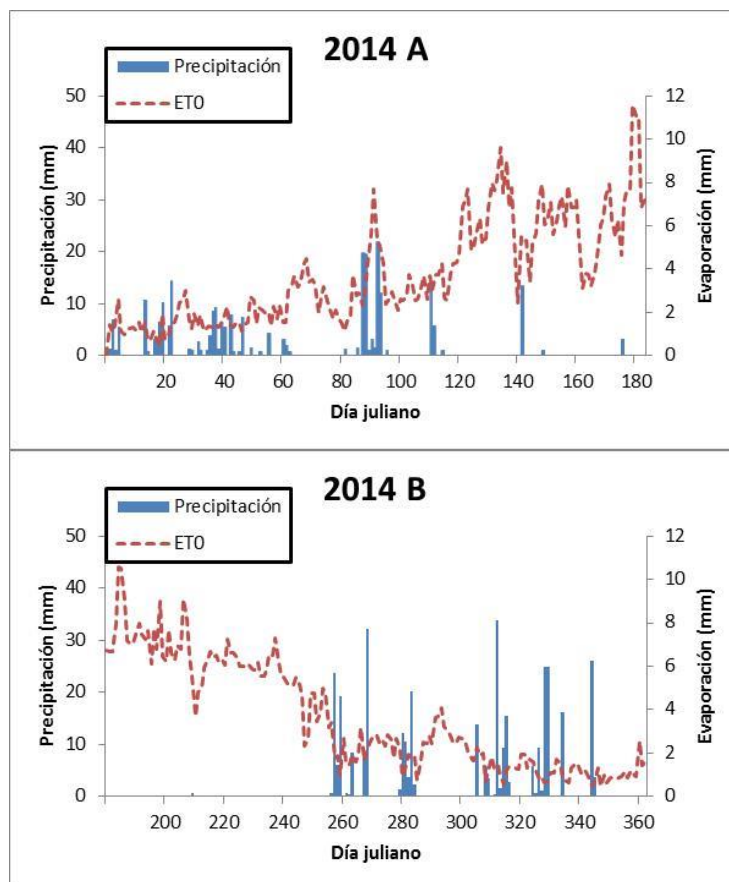


Figura 4.3.16. Evaporación potencial y precipitación incidente para el año 2014

4. Resultados y discusión

Observando las bondades de los modelos analíticos de interceptación de lluvias y siendo coherente con la escala temporal a la cual se registraron los valores de precipitación y las demás variables meteorológicas utilizadas para el cálculo de evaporación potencial, se procedió a implementar el modelo de Rutter para *Pinus pinea* y de Gash para *Cistus ladanifer*.

Se utilizaron los parámetros hallados en los modelos que tuvieron el mejor ajuste. Se trabajó con lluvias con valores superiores a 0,1 mm para un total de 86 eventos durante el año 2014 en *Pinus pinea* y de 114 eventos en *Cistus lanadifer*. De la aplicación del modelo de Rutter para *Pinus pinea* y de Gash para *Cistus ladanifer* se obtuvo la redistribución total de agua en cada individuo para el periodo de analizado (tabla 4.3.12 y 4.3.13).

Tabla 4.3.12. Estadísticos de flujos de agua en *Pinus pinea* con el modelo original de Rutter para el año 2014.

<i>Pinus pinea</i> P _{M1} (n = 86)	P	Tr	Sf	I
Suma	612.3	463.4	0.7	148.2
%P incidente	100	75.7	0.1	24.2
Media	7.1	5.4	0.01	1.7
Desv. Estándar	11.0	10.0	0.01	1.6
Max.	51.1	47.4	0.06	9.0
Min.	0.1	0.0	0.0	0.1
C.V. (%)	1.5	1.9	1.6	0.9

<i>Pinus pinea</i> P _{M2} (n = 86)	P	Tr	Sf	I
Suma	612.3	468.1	2.1	142.1
%P incidente	100	76.4	0.3	23.2
Media	7.1	5.4	0.02	1.7
Desv. Estándar	11.0	10.0	0.04	1.6
Max.	51.1	47.2	0.18	9.0
Min.	0.1	0.0	0.0	0.1
C.V. (%)	1.5	1.8	1.5	1.0

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

Tabla 4.3.13. Estadísticos de flujos de agua en *Cistus ladanifer* con el modelo original de Gash para el año 2014.

<i>Cistus ladanifer</i> J1 (n = 86)	P	Tr	Sf	I
Suma	612.3	443.8	103.9	64.7
%P incidente	100	72.5	17	10.6
Media	5.5	4.0	0.9	0.4
Desv. Estándar	8.1	6.3	1.5	0.3
Max.	39.3	31	7.1	1.1
Min.	0.1	0.1	0.0	0.2
C.V. (%)	1.5	1.6	1.6	0.6

De la simulación realizada durante el año 2014, se obtiene que para una precipitación de 612,3 mm, tendrá lugar una precipitación neta de 464,1 mm y 470,2 mm en los árboles de *Pinus pinea* P_{M1} y P_{M2}, respectivamente, y de 547,7 mm en la planta de *Cistus ladanifer*. De estos resultados se deduce que la cobertura de *Pinus pinea* y de *Cistus ladanifer* son capaces de interceptar más del 20% y del 10% de la precipitación incidente, respectivamente, lo que se traduce en una reducción de caudales y de la erosión y, por tanto, actuando como un regulador de los demás procesos del ciclo hidrológico. El porcentaje restante forma parte de la precipitación neta o cantidad de agua que alcanza el suelo, que puede convertirse en escorrentía, infiltrarse o evaporarse si por ejemplo existe una capa de hojarasca que realice un proceso de interceptación de lluvia. Los valores de escorrentía cortical no superan el 1% en *Pinus pinea*, lo que confirma su irrelevancia en el ciclo hidrológico, no siendo así en el caso de *Cistus ladanifer*, donde la escorrentía cortical alcanza valores superiores al 15% de la precipitación incidente.

Se graficó el comportamiento de la partición del agua de lluvia a través de la representación de valores acumulados para el año 2014 (Figura 4.3.17 y 4.3.18).

4. Resultados y discusión

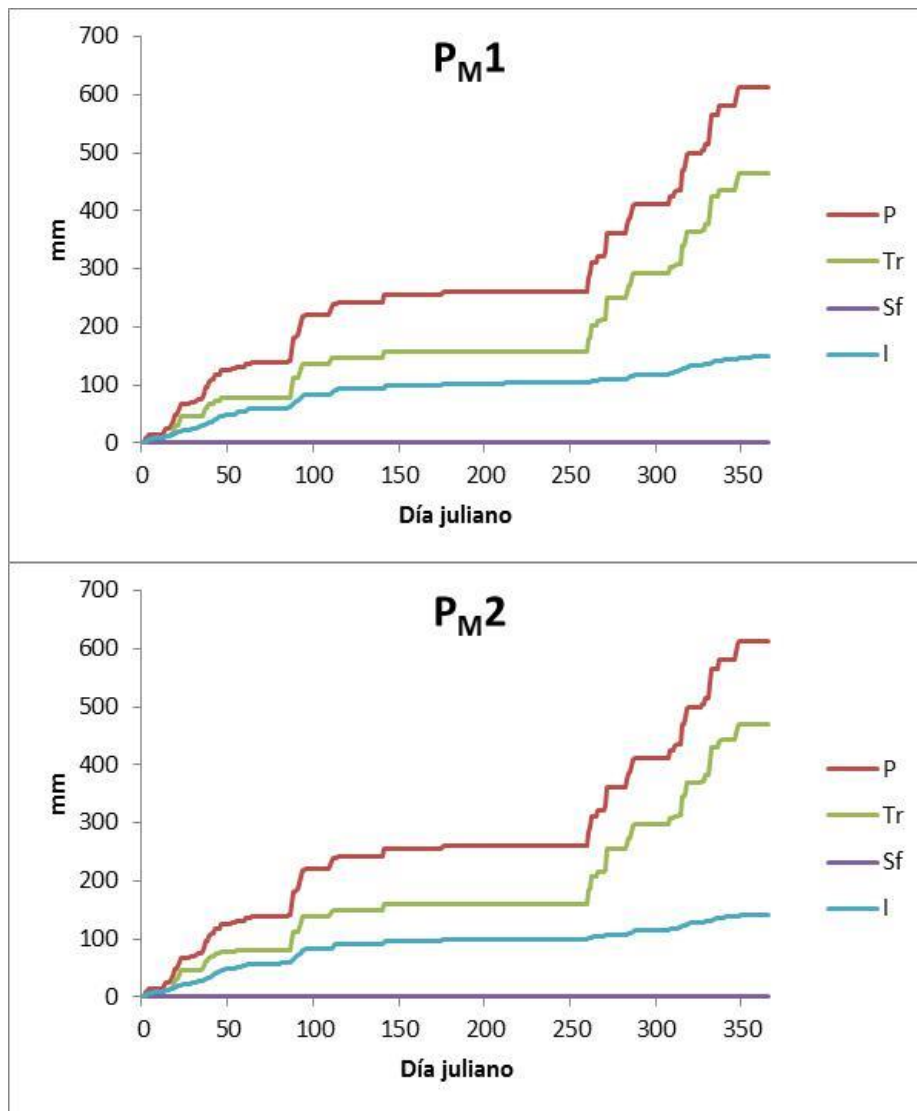


Figura 4.3.17. Flujos de agua acumulados simulados en *Pinus pinea* para el año 2014.

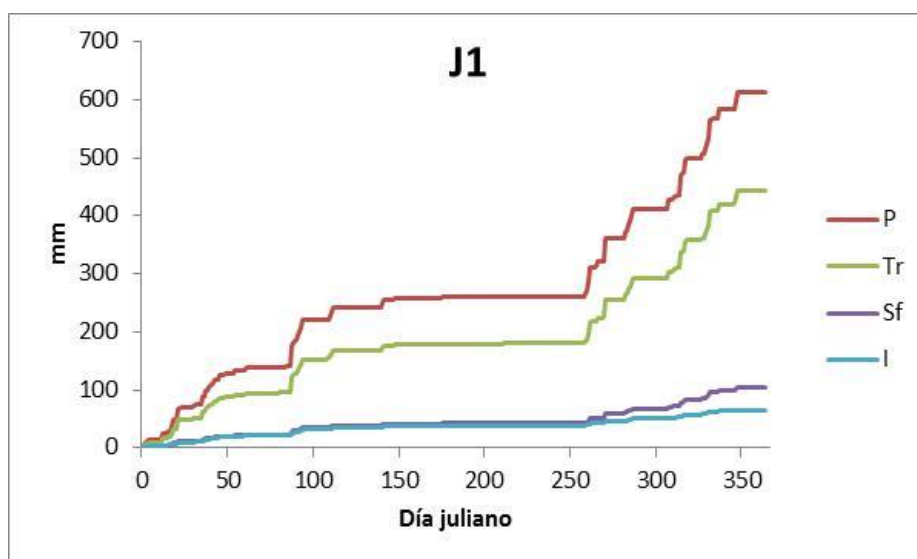


Figura 4.3.18. Flujos de agua acumulados simulados en *Cistua ladanifer* para el año 2014.

Las estimaciones de la interceptación realizadas concuerdan con los resultados experimentales obtenidos en los ejemplares de estudio analizados. Los resultados obtenidos mediante los modelos de interceptación permiten estudiar la evolución del agua almacenada en la cubierta durante episodios de lluvia concretos, y analizar así las escalas estacionales y de evento, y su incidencia en los patrones anuales de interceptación.

Las pérdidas por interceptación son cuantitativamente más relevantes en *Pinus pinea* dada su mayor fracción de cobertura a lo largo del año, donde de forma media, hasta un 30% de la lluvia anual es interceptada. El principal componente de la partición de la precipitación en *Pinus pinea*, en términos cuantitativos, es la trascolación, representando la escorrentía cortical un porcentaje mínimo del total de precipitación registrada. En la figura 4.3.16 se observa que la precipitación neta y la translocación están muy ligadas, y como la escorrentía cortical tiene un comportamiento muy desigual en ambas especies, siguiendo una línea prácticamente horizontal y casi nula en *Pinus pinea*, mientras que en *Cistus ladanifer* (ver figura 4.3.17) la escorrentía cortical sigue también la trayectoria de la precipitación neta, quedando esta componente incluso por encima de la interceptación.

CHAPTER 5

CONCLUSIONS

5. CONCLUSIONS

5.1. General conclusions

The conclusions drawn from this study are quite robust because they are based on the study of several individuals of *Pinus pinea* and *Cistus ladanifer* for 5 years. It shows that interception plays an important role in the water balance because it reduces the amount of water that reaches the forest floor. It is important to discover to which the extent the interception affects the role of forest cover in rainwater partition. Comparatively, in general terms, *Pinus pinea* specimens intercept higher proportion of precipitation (31,6%) than *Cistus ladanifer* specimens (15,7%), due to the tree has a higher biomass and density of canopy compared with the shrub, which has very low water retention capacity. All this evidences that rainwater interception varies depending on the type of vegetation.

Throughfall is broadly similar in *Pinus pinea* (68,2%) and *Cistus ladanifer* (67,5%), being the main difference between these species the amount of stemflow, that is almost negligible for *Pinus pinea*, while in the case of *Cistus ladanifer* stemflow represents nearly 17% of gross precipitation. The difference in height between both species, the degree of insertion of the branches of the shrub that facilitates waterflow to the trunk, and the slimy stuff that impregnate its leaves and stems acts as a water repellent, are responsible for these large differences.

The influence of different meteorological parameters on the interception process has been studied in detail in these two species. It has been shown that the intensity and duration of precipitation alter the percentage of interception similarly in the two canopies. Interception losses present an inverse potential relationship with the event rainfall intensity. More intense rains are intercepted to a lesser extent because the vegetation cover reaches saturation rapidly and drains excess water to the ground. With less intense rainfalls, interception reaches its highest values, decreasing significantly with increasing duration and precipitation intensity.

The redistribution of rainfall in throughfall and stemflow is strongly affected by the characteristics of rainfall events, so that both variables increase when the amount of rainfall, duration and intensity are greater. Similarly they are related to other meteorological variables (temperature, wind speed and wind direction), increasing throughfall and stemflow as the rain event occurs with higher temperature, higher wind speed and the prevailing wind direction.

A multiple linear regression was carried out using the SLR statistical model to describe interception as a function of only two climatic variables. Thus, for *Pinus pinea* the climatic variables were intensity and duration of the rainfall event and for *Cistus ladanifer* intensity and volume of the rainfall event. The intensity of precipitation has proved to be the climate variable that affects the interception processes directly in our study area.

Interception is a highly variable process both seasonally and annually according to the annual precipitation. It has been observed that in dry years interception is almost double than in wet years. Also it has been found a seasonal effect on the interception capacities of both species, which are higher in spring when the vegetation grows.

Given the variability of rainfall in our climate, the longer the data series, the better we come to understand the hydrological processes involved in the interception, so the available data series should cover periods longer than one year.

Studying the structural parameters of *Pinus pinea* that influence rain partition processes it has been obtained that the cortical runoff is linearly related to the Funneling Ratio parameter ($R^2=0,92$). Other features that influence in the S_f are canopy size (h_{copa} , V_{copa}) and trunk diameter (DBH). A greater volume and height of canopy mean higher branching, which reduces the production of stemflow. The same applies to the stem, being much more efficient producing stemflow when the diameter is smaller.

With respect to throughfall, the $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$ parameter is the best linearly related ($R^2=0,58$), concluding that increasing the value of this ratio, namely, the higher the pine height compared to the canopy, the higher Tr will be. Leaf area index (LAI) is the following parameter in degree of influence on Tr , with a linear and inverse relationship ($R^2=0,54$), as the throughfall depends on the number of existing gaps in the canopy.

5. Conclusions

Finally, with regard to interception, the four parameters that have a greater influence are $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$, $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$, diameter at breast height (DBH) and leaf area index (LAI). It follows that the interception depends on the tree structure ($h_{\text{árbol}}$, h_{fuste} and h_{copa}), the thickness of the stem (DBH) ($R^2=0,41$) and the number of existing gaps in the canopy, with a linear and direct relationship ($R^2=0,53$).

A high degree of correlation between Leaf Area Index (*IAF*) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been found, so that continuous measurement of NDVI can be used to estimate *IAF* and observe its variation throughout the year.

The moisture sensors installed on the ground have revealed that the area under the canopy of both species has a significant influence on the dynamics of soil water. The canopy dripping and the stemflow generate a slow and prolonged water flow that increases humidity with respect to areas without vegetation cover.

The results of this study lead to conclude that there are no significant differences between the averages of the throughfall collected with the three measurement methods used in *Pinus pinea* (automatic rain gauges, gutters and manual rain gauges randomly distributed), so we can state that with any of them similar values of throughfall can be obtained, and that the number and distribution of rain gauges used was appropriate.

It has been possible to establish the minimum period between events from the average drying time for each species canopy. It has been obtained that, on average, the time required to dry completely the pine canopy (9,2 hours) is much higher than for *cistus* (4,4 hours). It has also been possible to observe how this drying time varies throughout the year, being the drying time in the summer months much smaller than in the winter months. We also analyzed the canopy drying time according the time of the day when the rain ends, which is longer if the end of the precipitation takes place at night; it decreases if the rain stops during the day. This variation is due to the increase in net radiation and evaporative demand during daylight hours.

Both Saxena methodology as Klaassen, gave a good estimation of the canopy storage capacity for the two species, obtaining almost identical values, demonstrating the applicability of these methods to determine this variable. A greater storage capacity of the canopy and lower of the stem in *Pinus pinea* compared with *Cistus ladanifer* was observed, values that match the characteristics of each species.

The application of rainfall interception models has led to more than remarkable adjustments, as the differences between field measurements and model results are less than 7%. As an original contribution to this work, it has been improved the implementation thereof, especially the Rutter model, adjusting to our climatic conditions some of the proposed expressions.

The selected models for simulations allow an adjusted estimation of interception losses that take place in each individual. In general, an underestimation was presented in the amount of simulated interception. In the case of *Pinus pinea*, the original Rutter model shows more adjusted values to the field measurements, being the original Gash model fits best *Cistus ladanifer* interception, in the first case with a difference from field measures lower than 3% and in the second case 2.1%.

In the sensitivity analysis performed it was observed that the parameters with the highest incidence in the interception were the storage capacity of the canopy in the model Rutter and free throughfall coefficient in the Gash model. It was also found that the parameter trunk storage capacity is less sensitive in both models, namely, the changes in this parameter does not affect the model outputs.

The main sources of uncertainty in the estimation of interception, regardless of the errors inherent to the recording of meteorological data and processing of data collected on field, are primarily the quantification of the maximum canopy storage capacity (S), the linear assumptions used in the formulation of certain model parameters, and the difficulties for model calibration.

5.2. Future research

Whereas this is the first work done at the level of isolated individuals in the catchment area of El Cabril, and, although it has been done in great detail, some issues have not been resolved or have been treated superficially, as such a broad subject is not reachable in a single study, so it can be an interesting starting point for future works.

After the results presented in this document, the new research may focus on the following points:

Study in depth of the influence of the architecture of the tree in the interception to develop a simulation model of the tree architecture-throughfall.

5. Conclusions

Analysis of the temporal variation of the S and p parameters, which better represents the changes in vegetation.

Determination of throughfall using statistical and random techniques that allow considering the distribution of number of gaps in the canopy.

Rainfall interception loss study in seasonal vegetation and leaf litter.

Estimation of precipitation reaching the ground in heterogeneous vegetation plots

Establishment of net precipitation maps reaching the ground in wide areas of the basin.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones generales

Las conclusiones obtenidas en el presente estudio son bastante sólidas pues se basan en el estudio de varios ejemplares de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer* durante 5 años. Se demuestra que la interceptación es un componente importante del balance hídrico, ya que reduce la cantidad de agua que llega al suelo del bosque, y es importante conocer en qué medida lo hace para definir mejor el papel de la cubierta forestal en la partición del agua de lluvia. Comparativamente, en términos generales, los ejemplares de *Pinus pinea* interceptan un mayor porcentaje de precipitación (31,6%) que los individuos de *Cistus ladanifer* (15,7%), debido a que el árbol tiene una biomasa y una densidad del dosel superior en comparación con la jara, que tiene una capacidad de retención de agua muy escasa. Todos estos aspectos ponen de manifiesto que la interceptación de agua de lluvia varía según el tipo de vegetación.

La trascolación es muy similar en *Pinus pinea* (68,2%) y *Cistus ladanifer* (67,5%), estando marcada la gran diferencia entre ambas especies por la cantidad de escorrentía cortical que generan, que en el caso de *Pinus pinea* es prácticamente despreciable, mientras que en el caso de *Cistus ladanifer* puede llegar a representar el 17% de la precipitación bruta. La diferencia de altura entre ambas especies, el grado de inserción de las ramas de las jaras que favorece el flujo de agua hacia el tronco y la sustancia pegajosa que impregna sus hojas y tallos actuando como repelente de agua, son los causantes de estas grandes diferencias.

La influencia de diferentes parámetros meteorológicos sobre el proceso de interceptación ha sido estudiada con detalle en estas dos especies. Se ha demostrado que la intensidad y la duración de las precipitaciones alteran el porcentaje de interceptación de forma similar en las dos cubiertas vegetales. Las pérdidas por interceptación presentan una relación de tipo potencial inversa con la intensidad del evento de lluvia. Las lluvias de mayor intensidad son interceptadas en menor proporción debido a que la cubierta vegetal alcanza la saturación rápidamente y drena el exceso de agua hacia el suelo. Con lluvias de menor intensidad, la interceptación alcanza sus valores más altos,

5. Conclusiones

disminuyendo considerablemente con el aumento de la duración e intensidad de las precipitaciones.

La redistribución de las precipitaciones en trascolación y escorrentía cortical está fuertemente afectada por las características de los eventos de lluvia, de forma que ambas variables aumentan cuando los eventos son de mayor cantidad, duración e intensidad. De igual modo se relacionan con las restantes variables meteorológicas estudiadas (temperatura, velocidad y dirección del viento), aumentando la trascolación y la escorrentía cortical a medida que el evento de lluvia tenga lugar a mayor temperatura, mayor velocidad del viento y la dirección del viento sea la dominante.

Mediante el modelo estadístico SLR se determinó, por medio de una regresión lineal múltiple, que la interceptación es adecuadamente descrita con solo dos variables climáticas, en *Pinus pinea* con la intensidad y la duración de los eventos de lluvia (explican el 77%), y en *Cistus ladanifer* con la intensidad y el volumen del evento de precipitación (explican el 76%). La intensidad de la precipitación ha resultado ser la variable climática que condiciona de una forma más directa los procesos de interceptación en nuestro ámbito de estudio.

La interceptación es un proceso altamente variable que difiere también entre las distintas estaciones del año y según la precipitación anual. Se ha observado que en los años de sequía la interceptación es casi el doble que la que tiene lugar durante los años lluviosos. Igualmente se ha encontrado un efecto estacional en las capacidades de interceptación de ambas especies, siendo ésta mayor durante la primavera debido al crecimiento de la vegetación que tiene lugar en esta estación.

Dada la variabilidad de las precipitaciones de nuestro clima, cuanto más larga sea la serie de datos, mejor podremos llegar a comprender los procesos hidrológicos que intervienen en la interceptación, por lo que se recomienda el uso de datos durante períodos de más de un año.

Del estudio realizado para el análisis de los parámetros estructurales de *Pinus pinea* que influyen sobre los procesos de partición de la lluvia se ha obtenido que la escorrentía cortical está relacionada linealmente con el parámetro Funneling Ratio ($R^2=0,92$). Otras características que influyen en la S_f son tamaño de copa (h_{copa} , V_{copa}) y diámetro del tronco del árbol (DBH). A mayor volumen y altura de copa mayor es la ramificación, lo que disminuye la eficiencia en la producción de escorrentía cortical.

Igual ocurre con el fuste, que es mucho más eficiente produciendo escorrentía cortical mientras más pequeño sea su diámetro.

Con respecto a la trascolación, el parámetro $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$ es el que mejor se relaciona linealmente ($R^2=0,58$), deduciéndose que al aumentar el valor de este cociente, es decir, conforme más alto sea el pino en comparación con la altura de su dosel, mayor será la *Tr*. El *IAF* es el siguiente parámetro que más influyen en la *Tr*, con una relación lineal e inversa ($R^2=0,54$), ya que la trascolación depende del número de huecos existente en el dosel.

Finalmente, con respecto a la interceptación, las cuatro variables que tienen una mayor influencia son el parámetro $h_{\text{árbol}}/h_{\text{copa}}$, el parámetro $h_{\text{árbol}}/h_{\text{fuste}}$, el diámetro a la altura del pecho (DBH) y el índice de área foliar (*IAF*). De lo anterior se concluye que la interceptación depende de la estructura del árbol ($h_{\text{árbol}}$, h_{fuste} y h_{copa}), así como del grosor del fuste (DBH) ($R^2=0,41$) y del número de huecos existente en su dosel, con una relación lineal y directa ($R^2=0,53$).

Se ha encontrado un alto grado de correlación entre el Índice de Área Foliar (*IAF*) y el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), por lo que la medida continua del NDVI puede ser utilizada para la estimación del *IAF* y observar así su variación a lo largo del año.

Se ha puesto de manifiesto, mediante los sensores de humedad instalados en el suelo, que la zona bajo el dosel de ambas especies tiene una influencia importante en la dinámica del agua del suelo, ya que al existir un flujo de agua lento y prolongado procedente del goteo del dosel y de la escorrentía cortical, se favorece el incremento de humedad con respecto a las zonas fuera de ellas.

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 utilizados en *Pinus pinea* (pluviómetros automáticos, canaletas y pluviómetros manuales aleatoriamente distribuidos), por lo que se puede afirmar que con cualquiera de ellos se obtendrán valores similares de trascolación, y que el número y la distribución de los pluviómetros utilizados fue el adecuado.

Ha sido posible establecer el periodo mínimo entre eventos a partir de la determinación del tiempo de secado medio del dosel para cada especie. Se ha obtenido

5. Conclusiones

que, en promedio, el tiempo requerido para que el dosel de pino se seque por completo (9,2 horas) es mucho mayor que para la jara (4,4 horas). Además ha sido posible observar como varía este tiempo de secado a lo largo del año, siendo la duración necesaria para que se seque el dosel en los meses de verano bastante menor que en los meses de invierno. También se ha analizado el tiempo de secado del dosel según el momento del día en el que finaliza la lluvia, siendo este tiempo mayor si el fin de la precipitación tiene lugar durante la noche y disminuyendo si la lluvia cesa durante el día. Esta variación se debe al aumento de la radiación neta y a la demanda por evaporación durante las horas del día.

Tanto la metodología de Saxena como la de Klaassen, dieron una buena estimación de la capacidad de almacenamiento del dosel para las diferentes especies, obteniéndose valores casi idénticos, lo que demuestra la aplicabilidad de ambos métodos para determinar dicha variable. Se observa una mayor capacidad de almacenamiento del dosel y una menor del fuste en *Pinus pinea* en comparación con *Cistus ladanifer*, valores acordes a las características de cada especie.

La aplicación de los modelos de interceptación de lluvia ha conducido a ajustes más que notables, ya que las diferencias entre las medidas en campo y los resultados de los modelos son inferiores al 7%. Como aportación original de este trabajo, se ha mejorado la aplicación de los mismos, especialmente el de Rutter, ajustando a nuestras condiciones climáticas algunas de las expresiones propuestas.

Los modelos seleccionados para la simulación permiten una estimación ajustada de las pérdidas de interceptación que tienen lugar en cada individuo. En general se presentó una subestimación en la cantidad de interceptación simulada. 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*, en el primer caso con una diferencia respecto a las medidas de campo inferiores al 3% y en el segundo caso del 2,1%.

En el análisis de sensibilidad efectuado se observó que los parámetros de mayor incidencia en la interceptación fueron la capacidad de almacenamiento del dosel en el modelo de Rutter y el coeficiente de trascolación libre en el modelo de Gash. Se encontró además que el parámetro de capacidad de almacenamiento del tronco es muy

poco sensible en ambos modelos, es decir, que los cambios en este parámetro no afectan a las salidas del modelo.

Las principales fuentes de incertidumbre en la estimación de la interceptación, con independencia de los errores inherentes al registro de datos meteorológicos y tratamiento de los datos recogidos en campo, son principalmente la cuantificación de la capacidad máxima de almacenamiento de la cubierta (S), las hipótesis adoptadas en la formulación lineal de ciertos parámetros del modelo, y la dificultad de realizar una calibración directa del modelo.

5.2. Líneas futuras de investigación

Considerando que éste es el primer trabajo que se realiza a escala de individuos aislados en la cuenca hidrológica de El Cabril, y, aunque se ha hecho con gran detalle, algunas cuestiones no han sido resueltas o han sido tratadas de una forma más superficial, ya que una temática tan amplia no es abarcable en un único estudio, por lo que puede ser un interesante punto de partida para trabajos futuros.

A la vista de los resultados presentados en este documento, las nuevas líneas de investigación se pueden enfocar de acuerdo a lo recogido en los siguientes puntos:

Profundización en el estudio de la influencia de la arquitectura del árbol en la interceptación, con la posibilidad de desarrollar un modelo de simulación arquitectura-trascolación.

Análisis de la variación temporal de los parámetros S y p , que represente de mejor manera los cambios sufridos por la vegetación.

Determinación de la trascolación mediante técnicas de carácter estadístico o aleatorio que estudien la distribución del número de huecos del dosel.

Estudio de la pérdida de lluvia por interceptación en vegetación estacional y hojarasca.

Estimación de la precipitación que alcanza el suelo en parcelas de vegetación heterogénea

Establecimiento de mapas de precipitación neta que alcanza el suelo en amplias zonas de la cuenca.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aboal, J. R., Jiménez, M. S., Morales, D., Hernández, J. M. (1999). Rainfall interception in laurel forest in the Canary Islands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(2), 73–86. [http://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00083-0](http://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00083-0)
- Abrahams, A. D., Parsons, A. J., Wainwright, J. (2003). Disposition of rainwater under creosotebush. *Hydrological Processes*, 17(13), 2555–2566. <http://doi.org/10.1002/hyp.1272>
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactionson Automatic Control*, 19(6), 716–723. <http://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Allue Andrade, J. L. (1990). *Atlas fitoclimático de España. Taxonomías*. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Alvera, B. (1976). Contribución al estudio de la intercepción 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: 1er Año De Observaciones (1971-1972). *Centro Pirenaico de Biología Experimental*, 8, 7–13.
- Analytical Software. (2013). *Statistix 10 User's Manual*. Tallahassee.
- Anderson, R. S. (1971). Radiation and crop structure. *Plant Photosynthetic Production. Manual of Methods*. (eds Z. Sestak, J. Catsky, and P. G. Jarvis). W. Junk, The Hague. 412-466.
- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J. L., Royo, C. 2002. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science*, 42, 1547–1555.
- Aránzazu Prada, M., Gordo, J., De Miguel, J., Mutke, S., Catalán-Bachiller, G., Iglesias, S., Gil, L. 1997. Las regiones de procedencia de *Pinus pinea* L. en España (Ed). *Organismo Autónomo Parques Nacionales*, 109 p.
- Aston, A. R. (1979). Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology*,

42(3-4), 383–396. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90057-X](http://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90057-X)

Attarod, P., Sadeghi, S. M. M., Pypker, T. G., Bagheri, H., Bagheri, M., Bayramzadeh, V. (2015). Needle-leaved trees impacts on rainfall interception and canopy storage capacity in an arid environment. *New Forests*, 46(3), 339–355.
<http://doi.org/10.1007/s11056-014-9464-2>

Aussenac, G. (1968). Interception des précipitations par le couvert forestier. *Annales Des Sciences Forestières*, 25(3), 135–156. <http://doi.org/10.1051/forest/19680302>

Aussenac, G. (1970). Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. *Annales Des Sciences Forestieres*, 27, 383–399.
<http://doi.org/10.1051/forest/19700403>

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. *Unpublished PhD Thesis*. Univesidad de Alicante.

Bellot, J., Escarre, A. (1991). Chemical Characteristics and Temporal Variations of Nutrients in Throughfall and Stemflow of 3 Species in Mediterranean Holm Oak Forest. *Forest Ecology and Management*, 41(01-Feb), 125–135. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:A1991FW36400008

Bellot J, Ávila A, Rodrigo A. (1999). Throughfall and stemflow. In Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests, Rodá F, Retana J, Gracia CA, Bellot J (eds). *Ecological Studies* 137. Springer-Verlag: Heidelberg; 209–222.

Belmonte Serrato, F., Romero Diaz, A. (1993): Instrumentos y métodos para el estudio de la capacidad de interceptación de algunas especies vegetales mediterráneas “El Ardal” (Murcia). *Nuevos Procesos Territoriales*, AGE, Sevilla, 181-185

Belmonte Serrato, F. (1997). Interceptación en bosque y matorral mediterráneo semiárido: Balance hídrico y distribución espacial de la lluvia neta. *Tesis doctoral*. Universidad de Murcia. 375pp.

Belmonte Serrato, F., Romero Diaz, A. (1998). A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub: interception flow collection box. *Hydrological Processes*, 12(December 1996), 471–481. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19980315\)12:3<471::AID-HYP586>3.3.CO;2-5](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19980315)12:3<471::AID-HYP586>3.3.CO;2-5)

6. Bibliografía

- Belmonte Serrato, F., Romero Díaz, A. (1998). Modelos y técnicas en interceptación. *Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología*, 5-29.
- Bhark, E. W., Small, E. E. (2003). Association between plant canopies and the spatial patterns of infiltration in shrubland and grassland of the Chihuahuan desert, New Mexico. *Ecosystems*, 6(2), 185–196. <http://doi.org/10.1007/s10021-002-0210-9>
- Bouten, W., Swart, P. J. F., De Water, E. (1991). Microwave transmission, a new tool in forest hydrological research. *Journal of Hydrology*, 124(1-2), 119–130. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90009-7](http://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90009-7)
- Brandt, C. J. (1989). The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena*, 16(4-5), 507–524. [http://doi.org/10.1016/0341-8162\(89\)90032-5](http://doi.org/10.1016/0341-8162(89)90032-5)
- Bulcock, H. H., Jewitt, G. P. W. (2012). Modelling canopy and litter interception in commercial forest plantations in South Africa using the Variable Storage Gash model and idealised drying curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(12), 4693–4705. <http://doi.org/10.5194/hess-16-4693-2012>
- Calabuig, E. L., Gago Gamallo, M. L., Gómez Gutiérrez, J. M. (1979). Influencia de la encina en la distribución del agua de lluvia. *Centro de Edafología Y Biología Aplicada de Salamanca*, 143–159.
- Calabuig, E. L. (1992). Bioclima. In *El Libro de las Dehesas Salamantinas*. Programa de creación de recursos para la educación ambiental, Junta de Castilla y León. Gráficas Ortega, Salamanca; 125–178.
- Calder, I. R. (1977). A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, central Wales. *Journal of Hydrology*, 33(3-4), 247–265. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(77\)90038-5](http://doi.org/10.1016/0022-1694(77)90038-5)
- Calder, I. R. (1986). A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 89(1-2), 65–71. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90143-5](http://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90143-5)
- Calder, I. R., Rosier, P. T. W. (1976). The design of large plastic-sheet net-rainfall gauges. *Journal of Hydrology*, 30(4), 403–405. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(76\)90121-9](http://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90121-9)
- Calvo de Anta, R.N., González, A.P., Viqueira, F.D. (1979). Nuevos datos sobre la influencia de la vegetación sobre la formación del suelo en Galicia. II. Aportes de

- elementos por lavado de cubierta y tronco. *An. Edafol. Agrobiol.* 38, 1675-1692.
- Cantù S. I., Humberto González, R. (2002). Propiedades hidrológicas del dosel de los bosques de pinoencino en el noreste de Mexico. *Ciencia UANL*, 1(1), 72–78.
Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/402/40250112.pdf>
- 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(3–4), 165–177.
[http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90229-O](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(91)90229-O)
- Carleton, T.J., Kavanagh, T. (1990). Influence of stand age and spatial location on throughfall chemistry beneath black spruce. *Can. J. For. Res.* 20, 1917–1925.
- Carlyle-Moses, D. E. (2004). Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, 58(2), 181–202. [http://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00125-3](http://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00125-3)
- Castroviejo S., Aedo C., Cirujano S., Laínz M., Montserrat P., Morales R., Garmendia F. M., Navarro C., Paiva J., Soriano C. (1993) Flora Iberica. *Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares*, 3. Real Jardín Botánico, CSIC, Madrid
- Chen, Y.-Y., Li, M.-H. (2015). Quantifying Rainfall Interception Loss of a Subtropical Broadleaved Forest in Central Taiwan (under review). *Water*, (January), 1–19.
<http://doi.org/10.3390/w8010014>
- 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(April 1999), 2903–2920.
- Crouse, R. P., Corbett, E. S., Seegrist, D. W. (1966). Methods of Measuring and Analyzing Rainfall Interception By Grass. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 11(2), 110–120. <http://doi.org/10.1080/02626666609493463>
- Dancette, C., Poulain J.F. (1969). Influence of *Acacia albida* on pedoclimatic factors and crop yields. *African Soils XIV* (1–2): 143–184.
- David, J., 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).

6. Bibliografía

- 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.
<http://doi.org/10.1002/hyp.6062>
- Deguchi, A., Hattori, S., Park, H.-T. (2006). The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 80–102.
<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.005>
- Díaz Gutiérrez, A., González Dugo, M. P., Polo Gómez, M.J. (2005). Cuantificación de las pérdidas por interceptación de agua de lluvia a escala de cuenca. Edición: Instituto Geológico y Minero de España; Madrid. *VI SIMPOSIO DEL AGUA EN ANDALUCIA*, TOMO I, 191-201. ISBN:84-7840-577-1.
- Díaz Gutiérrez, A. (2007). Series Temporales De Vegetación para un modelo hidrológico distribuido. *Trabajo Fin de Máster*. Universidad de Córdoba. 113 p.
- Diéguez Aranda, U., Barrio Anta, M., Castedo Dorado, F., Ruíz González, A.D., Álvarez Taboada, M.F., Álvarez González, J.G., Rojo Alboreca, A. (2003). Dendrometría. *Fundación Conde del Valle de Salazar*. Paraninfo.
- Dingman, S. (2002). Physical Hydrology. Prentice Hall, *Upper Saddle River*. 646 p.
- Domingo, F., Puigdefabregas, J., Moro, M. J., Bellot, J. (1994). Role of Vegetation Cover in the Biogeochemical Balances of Small Afforested Catchment in Southeastern Spain. *Journal of Hydrology*, 159(1-4), 275–289.
[http://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90261-5](http://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90261-5)
- Domingo, F., Sánchez, G., Moro, M. J., Brenner, a. J., Puigdefábregas, J. (1998). Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(3-4), 275–292.
[http://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00068-9](http://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00068-9)
- Draper, N. R., Smith, H. (1981). Applied Regression Analysis. *Wiley*, New York. 709 pp.
- Dunin, F., O'Loughlin, E., Reyenga, W. (1988). Interception loss from eucalypt forest: lysimeter determination of hourly rates for long term evaluation. *Hydrol.Process*. 2 (4), 315–329.

- Dunkerley, D. (2000). Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: A brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes*, 14, 669–678. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200003\)14:4<669::AID-HYP965>3.0.CO;2-I](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<669::AID-HYP965>3.0.CO;2-I)
- Eamus, D. (2001). How does ecosystem water balance influence net primary productivity?. *NEE Workshop proceedings* 18-20, 62-70.
- Escarré, A., Lledo, M.L., Bellot, J., et al. (1986). Balance hídrico, meteorización y erosión en una pequeña cuenca de encinar mediterráneo. *Proyecto LUCDEME* 11, ICONA, Monografía 47. Madrid, 57-110.
- Escudero, A., García, B., Gomez, J.M., Luis, E. (1985). The nutrient cycling in *Quercus rotundifolia* and *Q. Pyrenaica* ecosystems (dehesas) of Spain. *Oecologia Plantarum* 6, 73-86.
- Espejo-Pérez, A.J., Pedrera-Parrilla, A., Taguas-Ruíz, E., Martos-Rosillo, S., Martínez-García, G., Giráldez-Cervera, J.V., Vanderlinden, K. (2015). Procesos hidrológicos en el suelo de una parcela de olivar de montaña. *El agua en Andalucía. El agua, clave medioambiental y socioeconómica*, Tomo II, 739-748.
- Fathizadeh, O., Attarod, P., Pypker, T. G., Darvishsefat, A. A., Zahedi Amiri, G. (2013). Seasonal variability of rainfall interception and canopy storage capacity measured under individual oak (*Quercus brantii*) trees in western Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15(1), 175–188.
- Fernández Escobar, R., Trapero Casas, A., Domínguez Giménez, J. (2010). Experimentación en agricultura (Junta de Andalucía, Vol. 1). Sevilla: Secretaría General Técnica. Servicio de Publicaciones y Divulgación. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fleischbein, K., Wilcke, W., Goller, R., Boy, J., Valarezo, C., Zech, W., Knoblich, K. (2005). Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: Effects of canopy properties. *Hydrological Processes*, 19(7), 1355–1371. <http://doi.org/10.1002/hyp.5562>
- Ford, E. D., Deans, J. D. (1978). The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitk spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*,

6. Bibliografía

15, 905-917.

Forgeard, F., Gloaguen, Y. C., Touffet, J. (1980). Interception des précipitations et apport au sol d'éléments minéraux par les eaux de pluie et les pluviollessivats dans une hêtraie atlantique et dans quelques peuplements résineux en Bretagne. *Annales Des Sciences Forestières*, 37, 53–71.

García Apaza, E. (2005). Balance de agua y carbono en un ecosistema mediterráneo de costa. *Tesis Doctoral*. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. 259 p.

García Estríngana, P. (2011). Efectos de diferentes tipos de vegetación mediterránea sobre la hidrología y la pérdida de suelo. *Tesis Doctoral*. Universidad de Alcalá. 170 p.

García Ortiz, E. M. (2006). Efecto de la estructura de la copa en la partición de lluvia de tres especies arbustivas en clima semiárido. *Tesis Doctoral*. Universidad de Almería. 404 p.

García-Estringana, P., Alonso-Blázquez, N., Alegre, J. (2010). Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. *Journal of Hydrology*, 389(3-4), 363–372. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.017>

Gash, J. H. C., Stewart, J. B. (1975). The average surface resistance of a pine forest derived from bowen ratio measurements. *Boundary Layer Meteorol* 8, 453–464.

Gash, J. H. C. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(443), 43–55. <http://doi.org/10.1002/qj.49710544304>

Gash, J. H. C., Morton, A. J. (1978). An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford Forest. *Journal of Hydrology*, 38(1-2), 49–58. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90131-2](http://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90131-2)

Gash, J. H., Lloyd, C. R., Lachaud, G. (1995). Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170(1-4), 79–86. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02697-N](http://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02697-N)

Gerrits, A. M. J., Pfister, L., Savenije, H. H. G. (2010). Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest. *Hydrological Processes*, 24(21), 3011–3025. <http://doi.org/10.1002/hyp.7712>

- Gerrits, A. M. J. (2010). The role of interception in the hydrological cycle. *PhD Thesis*. VSSD, Delft, the Netherlands. Delft University of Technology.
- Gerrits, A. M. J., Savenije, H. H. G. (2011). *Treatise on Water Science*. Elsevier, Oxford.
- Gómez, J. A. (1998). Modelización de los procesos de interceptación de lluvia e infiltración en un olivar. *Tesis Doctoral*. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. España
- Gómez, J. A., Giráldez, J. V., Fereres, E. (2001). Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area. *Agricultural Water Management*, 49, 65–76. [http://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00116-5](http://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00116-5)
- Gómez, J. A., Vanderlinden, K., Giráldez, J. V., Fereres, E. (2002). Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management*, 55(1), 53–70. [http://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00181-0](http://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00181-0)
- González Cascón, M. R., López Arias, M., Serrano Játiva, M., Minaya Gallego, M. T. (1994). Balance de entradas/salidas de cationes en una pequeña cuenca forestal de *pinus sylvestris* en la Sierra De Guadarrama. *Ecología*, 157–166.
- Gonzalez Hidalgo, J. C. (1992). Pautas espaciales de la erosión hídrica en el semiárido aragonés. *Tesis Doctoral*. Universidad de Zaragoza. 375 pp.
- González de Tánago, M., García, M. J., Ortega, L., Pardilo, G., Tourné, M. (1988). Interceptación y alidad del agua de lluvia bajo diferentes condiciones de cubierta vegetal. *Ecología*, 2, 99–110.
- Grifrio, S., Oue, H., Sato, Y., Budiasa, W., Indra, B. (2015). Partitioning Rainfall into Throughfall , Stemflow and Interception Loss in Clove (*Syzygium aromaticum*) Plantation in Upstream Saba River Basin , Bali. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 280–285. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.036>
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.017>
- Hancock, N. H. ., Crowther, J. M. (1979). A technique for the direct measurement of

6. Bibliografía

- water storage on a forest canopy. *Journal of Hydrology*, 41, 105–122.
- Hashino, M., Yao, H., Yoshida, H. (2002). Studies and evaluations on interception processes during rainfall based on a tank model. *Journal of Hydrology*, 255(1-4), 1–11. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00506-6](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00506-6)
- Herwitz, S. R. (1986). Infiltration-excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest. *Earth Surface Processes and Landforms* 11, 401–412.
- Herwitz, S. R. (1987). Raindrop impact and water flow on the vegetation surfaces of trees and effect of stemflow and throughfall generation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 425-432.
- Herbst, M., Roberts, J. M., Rosier, P. T. W., Gowing, D. J. (2006). Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2-4), 244–256. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.10.012>
- Hogg, S. E., Murray, D. L., Manly, B. F. J. (1977). A method of estimating throughfall under a forest. *Paper presented at Annual Symposium Throughfall of the New Zealand Hydrologica Society*.
- Holder, C. D. (2007). Leaf water repellency of species in Guatemala and Colorado (USA) and its significance to forest hydrology studies. *Journal of Hydrology*, 336(1-2), 147–154. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.018>
- Horton, R. E. (1919). Rainfall Interception. *Science (New York, N.Y.)*, 47(9), 603–623. <http://doi.org/10.1126/science.27.693.594>
- Hot, R. (1998). Intercepción de lluvia por una plantación de *Pseudotsuga menziesii* y un bosque nativo del tipo Roble-Raulí-Coihue en la Reserva Forestal Malalcahuello, IX Región. *Tesis Doctoral*. Ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 109p.
- Huang, Y. S., Chen, S. S., Lin, T. P. (2005). Continuous monitoring of water loading of trees and canopy rainfall interception using the strain gauge method. *Journal of Hydrology*, 311(1-4), 1–7. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.036>
- Huber, A., Oyarzún, C. (1984). Factores Reguladores de la Intercepción en un Bosque Adulto de *Pinus radiata* (D. DON.). *Bosque*, 5(2), 59–64.

- Ibarra, P., Echeverría, M. T. (2004). Relaciones clima, suelo y vegetación en la vertiente Noreste del Moncayo. *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.*, 199–211.
- Iida, S., Tanaka, T., Sugita, M. (2006). Change of evapotranspiration components due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Journal of Hydrology*, 326(1-4), 166–180. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.002>
- Iroume, A., Huber, A. (2000). Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque*, 21(1), 45–56.
- Jackson, I. J. (1975). Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *Journal of Hydrology*, 24(3-4), 215–238. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(75\)90082-7](http://doi.org/10.1016/0022-1694(75)90082-7)
- Jackson, N. A. (2000). Measured and modelled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(4), 323–336. [http://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00145-8](http://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00145-8)
- Jarčuška, B., Kucbel, S., Jaloviar, P. (2010). Comparison of output results from two programmes for hemispherical image analysis: Gap light analyser and winscanopy. *Journal of Forest Science*, 56(4), 147–153.
- Jarvis, P. G., McNaughton, K. G. (1986). Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region. *Advances in Ecological Research*, 15(C), 1–49. [http://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60119-1](http://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60119-1)
- Jetten, V. G. (1996). Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. *Hydrological Processes*, 10(5), 671–685. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199605\)10:5<671::AID-HYP310>3.0.CO;2-A](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199605)10:5<671::AID-HYP310>3.0.CO;2-A)
- Johnson, W.M. (1942). The interception of rain and snow by a forest of young Ponderosa pine. *Earth and Space Science News* 23, 566–570. DOI: 10.1029/TR023i002p00566.
- Keim, R. F., Skaugset, A. E., Weiler, M. (2006). Storage of water on vegetation under

6. Bibliografía

- simulated rainfall of varying intensity. *Advances in Water Resources*, 29(7), 974–986. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.07.017>
- King, B. P., Harrison, S. J. (1998). Throughfall patterns under an isolated oak. *Weather*, 53, 111–121.
- Kitteridge, J. (1948). Interception and stemflow. *Forest influences*, 11, 603-623.
- Klaassen, W., Bosveld, F., De Water, E. (1998). Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 212-213(1-4), 36–50. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00200-5](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00200-5)
- Lankreijer, H., Hendriks, M., Klaassen, W. (1993). A comparison of models simulating rainfall interception of forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(3-4), 187–199. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90028-G](http://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90028-G)
- Latron, J., Llorens, P., García-Estringana, P., Roig Planasdemunt, M., Gallart, F. (2003). Estudio y modelización de la dinámica hidrológica de un ambiente mediterráneo de montaña. Síntesis de los resultados obtenidos a lo largo de 25 años de investigaciones en las cuencas de Vallcebre (Pirineo Oriental). *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: Homenaje al profesor José María García-Ruiz*.
- Leonard, R.E. (1965). Mathematical theory of interception. *Proc. International Symp. Forestry Hydrology*. Pergammon Press, New York.
- Levene, H. (1960). Robust tests for the equality of variance. Contributions to Probability and Statistics; Essays in Honor of Harold Hotelling. *Stanford University Press*.
- 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(1-4), 1–29. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00399-2](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00399-2)
- Levia, D. F., Michalzik, B., Nätke, K., Bischoff, S., Richter, S., Legates, D. R. (2015). Differential stemflow yield from European beech saplings: The role of individual canopy structure metrics. *Hydrological Processes*, 29, 43–51. <http://doi.org/10.1002/hyp.10124>
- Leyton, L., Reynolds, E. R. C., Thompson, F. B. (1967). Rainfall interception in forest

- and moorland. In: Sopper, W.E., Lull, H. W. (Eds.), *Forest Hydrology*. Pergamon Press, Oxford, pp. 163–178.
- Li, X., Xiao, Q., Niu, J., Dymond, S., van Doorn, N. S., Yu, X., Li, J. (2016). Process-based rainfall interception by small trees in Northern China: The effect of rainfall traits and crown structure characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218-219, 65–73. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.017>
- Limousin, J. M., Rambal, S., Ourcival, J. M., Joffre, R. (2008). Modelling rainfall interception in a mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment. *Journal of Hydrology*, 357(1-2), 57–66. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.001>
- Liu, S. (1997). A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling*, 99(2-3), 151–159. [http://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)01948-0](http://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)01948-0)
- Livesley, S. J., Baudinette, B., Glover, D. (2014). Rainfall interception and stem flow by eucalypt street trees - The impacts of canopy density and bark type. *Urban Forestry and Urban Greening*, 13(1), 192–197. <http://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.09.001>
- Llopis J. (1996). La estadística: Una orquesta hecha instrumento. *Editorial Ariel*. Madrid. 352p. ISBN: 9788434480247
- Llorens, P., Domingo, F. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335(1-2), 37–54. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.032>
- Llorens, P., García Estríngana, P., Molina, A. J., Latron, J., Domingo, F., Francesc Gallart i Gallego. (2013). Monitorización y modelización de la partición de lluvia por pino silvestre y roble pubescente en las cuencas de investigación de Vallcebre (Prepirineo catalán). *Interceptación de la lluvia por la vegetación en España*, 237-254. ISBN 978-84-92988-20.
- 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.

6. Bibliografía

- 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. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03334-3](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03334-3)
- Lloyd, C. R., Gash, J. H. C., Shuttleworth, W. J., de O. Marques F. A. (1988). The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43(3-4), 277–294. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(88\)90055-X](http://doi.org/10.1016/0168-1923(88)90055-X)
- Loescher, H. W., Powers, J. S., Oberbauer, S. F. (2002). Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 18(March 2002), 397–407. <http://doi.org/10.1017/S0266467402002274>
- López Sánchez, M. V. (1989). Estudio de los flujos hídricos y del estudio de la deposición seca y lixiviación en el aporte de nutrientes de un suelo forestal bajo encina (*Q. ilex*) y pino (*P. Sylvestris*). *Tesis Master of Science*. CIMEAM. IAM2.
- Loustau, D., Berbigier, P., Granier, A. (1992). Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. An application of Gash's analytical model of interception. *Journal of Hydrology*, 138(3-4), 469–485. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90131-E](http://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90131-E)
- McGregord, J. C., Mutchler, C. K. (1978). The effect of crop canopy on raindrop size distribution and energy. En *USDA. Sedimentation Laboratory Annual Report*, Oxford, MS.
- Madsen, H. V. (2007). Model Calibration Guideline. Hørsholm, Denmark. *Harmonised modeling tools for integrated basin management* (Harmoni-CA).
- Maene, L. M., Chong, S.P. (1979). Drop size distribution and erosivity of tropical rainstorms under the oil palm canopy. *Laporan Penyelidikan Jabatan Sains Tamah*, Universiti Pertanian Malasysia, Serdang, 81-93.
- Martin, P. J., Stephens, W. (2006). Willow growth in response to nutrients and moisture on a clay landfill cap soil . II : Water use. *Bioresource Technology*, 97(3), 449–458. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.004>
- Martínez-Zurimendi, P., Álvarez, J. M., Pando, V., Domínguez, M., Gordo, J., Finat, L., Sierra-de-Grado, R. (2009). Efectos del vibrado del pino piñonero (*Pinus pinea* L.)

- en el vigor de los árboles : densidad de copa , crecimiento de guías y parásitos de debilidad. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 18(1), 50–63.
- Massman, W. J. (1983). The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forest. *Agricultural Meteorology*, 28, 261–286.
- Mateos Rodríguez, A. B., Schnabel, S. (2001). Rainfall interception by Holm oaks in the Mediterranean open woodland. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 27, 27–38.
- Mateos Rodríguez, A. B., Schnabel, S. (2002). Variabilidad espacio-temporal de la lluvia trascolada bajo un encinar adhesada. *Geología 1*: 301-306. Instituto Geológico y Minero de España.
- 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), 39-49. ISSN 0214-1744,
- Mateos Rodriguez, A. B., Schnabel, S. (2009). Influencia de la poda del arbolado en el volumen y distribución de la lluvia sobre el suelo en el ecosistema dehesa. In *Avances en estudios sobre desertificación: aportaciones al Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. Thornes*, 579–582. Murcia. Retrieved from <http://84.88.0.34/index.php/CUGEO/article/view/16916>
- Mazza, G., Amorini, E., Cutini, A., Manetti, M. C. (2011). The influence of thinning on rainfall interception by *Pinus pinea* L. in Mediterranean coastal stands (Castel Fusano—Rome). *Annals of Forest Science*, 68(8), 1323–1332. <http://doi.org/10.1007/s13595-011-0142-7>
- Media Cybernetics. (2001). *Image-Pro Plus 4.5 Media Cybernetics Software*.
- Méndez Monroy, J. F. (2013). Metodología para la medición de variables hidrometeorológicas que faciliten la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvia en el contexto Colombiano. Universidad Nacional de Colombia. 154 p.
- Merriam, R. A. (1960). A note on the interception loss equation. *J. Geophys. Res.*, 65, 3850-3851.

6. Bibliografía

- Minaya Gallego, M. T. (1997). Balance hídrico anual en una cuenca de pinus sylvestris, 419–424.
- Molina, A. J., del Campo, A. D. (2012). The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 269, 206–213. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.037>
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society of Experimental Biology*.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., Vining, G. G. (2002). Selección de variable y construcción del modelo. In: *Introducción al Análisis de Regresión Lineal*. Compañía Editorial Continental. México, D. F., 261–290.
- Morán Tejada, C., Martínez Fernández, J., Hernández Santana, V., Cano Crespo, A. (2008). Trascolución y pérdidas por interceptación en un bosque de roble melojo del sistema central. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 34, 7–22.
- Moreno, G., Gallardo, J. F., Bussotti, F. (2001). Canopy modification of atmospheric deposition in oligotrophic Quercus pyrenaica forests of an unpolluted region (central-western Spain). *Forest Ecology and Management*, 149(1-3), 47–60. [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00544-2](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00544-2)
- Moreno-Pérez, M. F., Roldán-Cañas, J., Cienfuegos, I. (2012). Rainfall interception by the vegetation in a Mediterranean type climate. *European Geosciences Union General Assembly*. Viena.
- Moreno-Pérez, M. F., Roldán-Cañas, J., Pérez Arellano, R., Cienfuegos, I. (2013). Distribution of incident rainfall through vegetation in a watershed located in southern Spain. *European Geosciences Union General Assembly*. Viena.
- Moro, M. J., Domingo, F., Escarre, A. (1996). Organic matter and nitrogen cycles in a pine afforested catchment with a shrub layer of Adenocarpus decorticans and Cistus laurifolius in south-eastern Spain. *Annals of Botany*, 78(6), 675–685. <http://doi.org/10.1006/anbo.1996.0177>
- Motahari, M., Attarod, P., Pypker, T. G., Etemad, V., Shirvany, A. (2013). Rainfall Interception in a Pinus eldarica Plantation in a Semi- arid Climate Zone : An Application of the Gash Model. *Journal of Agricultural Science and Technology*,

15, 981–994.

- Mulder, J. P. M. (1985). Simulating interception loss using standard meteorological data. *The Forest-Atmosphere Interaction*, 177–196.
- Murakami, S. (2007). Application of three canopy interception models to a young stand of Japanese cypress and interpretation in terms of interception mechanism. *Journal of Hydrology*, 342(3-4), 305–319. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.032>
- Muzylo, A., Valente, F., Domingo, F., Llorens, P. (2012). Modelling rainfall partitioning with sparse Gash and Rutter models in a downy oak stand in leafed and leafless periods. *Hydrological Processes*, 26(21), 3161–3173. <http://doi.org/10.1002/hyp.8401>
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J. J., Domingo, F., Gash, J. H. C. (2009). A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370(1-4), 191–206. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.058>
- Nanko, K., Onda, Y., Ito, A., Moriwaki, H. (2011). Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(9), 1173–1182. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.04.006>
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Návar, J. (2013). The performance of the reformulated Gash's interception loss model in Mexico's northeastern temperate forests. *Hydrological Processes*, 27(11), 1626–1633. <http://doi.org/10.1002/hyp.9309>
- Návar, J., Bryan, R. B. (1994). Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern México. *Agricultural and Forest Meteorology*, 68(3-4), 133–143. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90032-9](http://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90032-9)
- Návar, J., Charles, F., Jurado, E. (1999). Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 124(2-3), 231–239. <http://doi.org/10.1016/S0378->

6. Bibliografía

1127(99)00077-8

- Nguy-Robertson, A. Gitelson, A., Peng, Y., Via, A., Arkebauer, T., Rundquist, D. (2012). Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal*, 104: 1336-1347.
- Olszyczka, B., Crowther, J. M. (1981). The application of gamma-ray attenuation to the determination of canopy mass and canopy surface-water storage. *Journal of Hydrology*, 49, 355–368.
- Park, A., Cameron, J. L. (2008). The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. *Forest Ecology and Management*, 255(5-6), 1915–1925.
<http://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.025>
- Parker, G. G., Harding, D. J., Berger, M. L. (2004). A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure. *Journal of Applied Ecology*, 41, 755–767.
- Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17(3), 4–22.
- Pereira, F. L., Gash, J. H. C., David, J. S., David, T. S., Monteiro, P. R., Valente, F. (2009). Modelling interception loss from evergreen oak Mediterranean savannas: Application of a tree-based modelling approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3-4), 680–688. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.014>
- Pereira, F. L., Gash, J. H. C., David, J. S., Valente, F. (2009). Evaporation of intercepted rainfall from isolated evergreen oak trees: Do the crowns behave as wet bulbs? *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3-4), 667–679.
<http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.013>
- Pereira, F. L., Valente, F., David, J. S., Jackson, N., Minunno, F., Gash, J. H. (2016). Rainfall interception modelling: is the wet bulb approach adequate to estimate mean evaporation rate from wet/saturated canopies in all forest types?. *Journal of Hydrology*, 543, 606-615.
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.035>
- Pérez Arellano, R., Moreno Pérez, M. F., Roldán Cañas, J., Cienfuegos Hevia, I. (2013). Influencia de las características de la precipitación sobre la interceptación de la

- vegetación en una cuenca mediterránea. *III Jornadas de Ingeniería del Agua*. Valencia.
- Pérez Arellano, R., Roldán Cañas, J., Moreno Pérez, M. F. (2014). Influencia meteorológica en la interceptación de la lluvia en *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. *XXXII Congreso Nacional de Riegos*. Madrid.
- Pérez Arellano, R., Serrano Gómez A., Roldán Cañas, J., Moreno Pérez, M. F. (2015a). Modelación de la partición de lluvia en especies arbóreas y arbustivas de clima mediterráneo. *XXXIII Congreso Nacional de Riegos*. Valencia.
- Pérez Arellano, R., Moreno Pérez, M. F., Roldán Cañas, J. (2015b). Seasonal and annual variability of interception for *Pinus pinea* and *Cistus ladanifer* in a watershed with Mediterranean climate. *European Geosciences Union General Assembly*. Viena.
- Pérez Arellano, R., Moreno Pérez, M. F., Roldán Cañas, J. (2015c). Aplicación de modelos de interceptación de lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* en la cuenca mediterránea de "El Cabril". *Simposio del agua en Andalucía*. Málaga.
- Pérez Arellano, R., Moreno Pérez, M. F., Roldán Cañas, J. (2015d). Interceptación de la lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*: efecto de diferentes parámetros climáticos. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua*. Córdoba.
- Pérez Arellano, R., Moreno Pérez, M. F., Roldán Cañas, J. (2016). Comparación de modelos de interceptación de agua en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. *Ingeniería del Agua*, 20(3): 153-168. DOI: 10.4995/la.2016.4713.
- Polo, M. J., Díaz Gutiérrez, A., González Dugo, M.P. (2011). Interception modeling with vegetation time series derived from Landsat TM data. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII*, In C.M.U. Neale, A. Maltese, K. Richter (Eds.), Proc. Of SPIE. Vol. 8174-0B.
- Quinn, N. W., Laflém, J. M. (1981). Properties of transformed rainfall under corn canopy. *ASAE Paper* 81-2059.
- Puigdefábregas, J., Sole, A., Lazaro, R., Nicolau, J. M. (1992). Factores que controlan la escorrentía en una zona semiárida con micaesquistos. *Estudios de Geomorfología En España*, 117–127.

6. Bibliografía

- 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.
<http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.03.003>
- Rapp, M., Romane, F. (1968). Egouttement des précipitations sous des pleuplements de *Quercus ilex* L. et de *Pinus halepensis* Mill. Contribution a l'étude du Bilan de l'eau dans les écosystèmes méditerranées. *Oecol. Plant.*, 3, 271-284.
- Rich, P.M. (1990). Characterising plant canopies using hemispherical photographs. Goel, N.S., Norman, J.M. (Eds.). Instrumentation for Studying Vegetation Canopies for Remote Sensing in Optical and Thermal Infrared Regions. *Remote Sensing Reviews*, 5, 13-29.
- Rivas-Martínez, S. (1987). Memoria del mapa de series de vegetación de España. 269p. Icona, Serie Técnica. *Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. Madrid.
- Roberts, J. M., Gash, J. H. C., Tani, M., Bruijnzeel, L.A., (2004). Controls of evaporation in lowland tropical rainforest. Bonell, M., Bruijnzeel, L.A. y Kirby, C. (Eds.), *Forest-Water-People in the Humid Tropics*, Cambridge University Press, 287-313.
- Robins, P.C. (1974). A method of measuring the aerodynamic resistance to the transport of water vapour from forest canopies. *Journal of Applied Ecology*, 11, 315-325.
- Rodrigo, A., Àvila, A. (2001). Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests. *Journal of Hydrology*, 243(3–4), 216–227. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00412-1](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00412-1)
- Rodríguez M.J., Morar R. (2002). Estadística informática: Datos y ejemplos con el SPSS. *Servicio de publicaciones*. Universidad de Alicante. ISBN: 9788479086381.
- 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(II), 43–52.
- Rowe, P. B., Colman, E. A. (1951). Disposition of Rainfall in Two Mountain Areas of California. *Technical Bulletin 1048*. U.S. Dept. of Agriculture.

<http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Rutter, A. J., Kershaw, K. A., Robins, P. C., Morton, A. J. (1971). A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9, 367–384.

[http://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90034-3](http://doi.org/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, 367–380.

Rutter, A. J., Morton A.J. (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, 567–588.

Sadeghi, S. M. M., Attarod, P., Van Stan, J. T., Pypker, T. G., Dunkerley, D. (2015). Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semiarid afforestations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 76–85.

<http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.006>

Samba, S. A. N., Camiré, C., Margolis, H. a. (2001). Allometry and rainfall interception of *Cordia alliodora* in a semi-arid agroforestry parkland, Senegal. *Forest Ecology and Management*, 154(1-2), 277–288. [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00633-2](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00633-2)

Santa Regina, I. (1995). Ciclos biogeoquímicos en bosques de la Sierra de Béjar (Salamanca). Retorno de bioelementos por medio del agua de lluvia. *Pirineos*, 145-146, 65–80. <http://doi.org/10.3989/pirineos.1995.v145-146.147>

Santiago Hernández, L. (2007). Medición Y Análisis De La Interceptación De Lluvia En Un Bosque De Encino: Aplicación a La Microcuenca La Barreta. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro.

Saxena, R. K. (1986). Estimation of canopy reservoir capacity and oxygen-18 fractionation in throughfall in a pine forest. *Nordic Hydrology*, 17(4-5), 251–260.

Savenije, H. H. G., (2005). Water Encyclopedia: Surface and Agricultural Water. *Wiley Publishers*, Ch. Interception.

Schottman, W.R. (1978). Estimation of the penetration of high-energy raindrops

6. Bibliografía

- through a plant canopy. *Unpublished PhD Thesis*. Cornell University. Ithaca. New York.
- Schulze, R. E., Scott-Shaw, C. R., Nanni, U. W. (1978). Interception by *Pinus Patula* in relation to rainfall parameters. *Journal of Hydrology*, 36, 393–396.
- Serrano-Muela, M. P. (2012). Influencia de la cubierta vegetal y las propiedades del suelo en la respuesta hidrológica : generación de escorrentía en una cuenca forestal de la montaña media pirenaica. *Tesis Doctoral*. Universidad de Zaragoza.
- Serrano-Muela, M. P., Regues, D., Estela Nadal-Romero, E. (2011). Trascolución y escorrentía cortical en la cuenca experimental de San Salvador, Pirineo Central español. *Cuaternario Y Geomorfología*, 25(1-2), 49–72.
- Shuttleworth, W. J., (1993). Handbook of Hydrology. *McGraw-Hill*, Ch. 4, 4.1–4.53.
- 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 and Soil*, 323(1-2), 249–265. <http://doi.org/10.1007/s11104-009-9934-z>
- Smart, S. D. G., Roberts, H. R. (1977). A revised stemflow gauges. In *Institute of hydrology report 43: Selected measurement techniques in use at Plynlimon Experimental Catchments*, Wallingford, Oxon, 45-47.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K., Verhoest, N. E. C. (2008). Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica L.*) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22, 33–45. <http://doi.org/10.1002/hyp>
- Stewart, J. B., (2004). Review of forest evaporation studies, primarily in the United Kingdom. In: Mencuccini, M., Grace, J., Moncrieff, J., McNaughton, K.G. (Eds.), *Forests at the Land–Atmosphere Interface*. CAB International, Edinburgh, UK, 159–174.
- Sun, X., Onda, Y., Kato, H., Gomi, T., Komatsu, H. (2015). Effect of strip thinning on rainfall interception in a Japanese cypress plantation. *Journal of Hydrology*, 525, 607–618. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.023>
- Tarazona, T., Regina, I. S., Calvo, R. (1996). Interception, throughfall and stemflow in two forest of the “sierra de la demanda” in the province of burgos. *Pirineos*,

- 27(147-148), 27–40. Retrieved from
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-11244333406&partnerID=tZOtx3y1>
- Teklehaimanot, Z., Jarvis, P. G. (1991). Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. *Journal of Applied Ecology*, 28, 603-618.
- Toba, T., Ohta, T. (2005). An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. *Journal of Hydrology*, 313(3-4), 208–220. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.003>
- Tromble, J. M. (1983). Interception of Rainfall by Tarbush. *Journal of Range Managemet*, 36(4), 525–526.
- Valente, F., David, J. S., Gash, J. H. C. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*, 190(1-2), 141–162. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03066-1](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03066-1)
- van Dijk, A. I. J., Bruijnzeel, L. A. (2001). Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. *Journal of Hydrology*, 247(3-4), 230–238. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00392-4](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00392-4)
- 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 p.
- Vis, M. (1986). Interception, drop size distributions and rainfall kinetic energy in four colombian forest ecosystems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11, 591-603.
- Wallace, J., McJannet, D. (2006). On interception modelling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 477–488. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.003>
- Wang, A., Diao, Y., Pei, T., Jin, C., Zhu, J. (2007). A semi-theoretical model of canopy rainfall interception for a broad-leaved tree. *Hydrological Processes*, 21, 2458–2463. <http://doi.org/10.1002/hyp>

6. Bibliografia

- Wang, X., Zhang, H., Zhang, Y., Hu, R., Pan, Y. (2015). Dependence of canopy water storage on raindrop size in revegetated desert shrub. *Hydrological Sciences Journal*, 60(4), 760–769. <http://doi.org/10.1080/02626667.2014.898120>
- Ward, R., Robinson M. (2000). Principles of Hydrology. Fourth Edition, *McGraw-Hill*, London, 450 p.
- Weiss, M., Baret, F., 2010. Can-Eye Version 6.1 User Manual. EMMAH (Mediterranean Environment and Agro-Hydro System Modelisation) Laboratory. *French National Institute of Agricultural Research (INRA)*, Avignon, 47p.
- Weiss, M., Baret, F. (2014). *CAN-EYE V6.313 User Manual*. (INRA Science & Impact, Ed.).
- 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, 109–126. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90025-L](http://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90025-L)
- Wright, I.R. (1977). Net rainfall below the forest canopy. Plynlimon throughfall-troughs and stemflow gauges. *Institut of Hydrology Report 43*. Selected measurement techniques in use at Plynlimon Experimental Catchment, Wallingford, Oxon, pp. 11-17.
- Wood, O. M. (1937). The Interception of Precipitation in an Oak-Pine Forest. *Ecology*, 18(2), 251–254.
- Xiao, Q., McPherson, E. G., Ustin, S. L., Grismer, M. E. (2000a). A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research*, 105(16), 29173–29188. <http://doi.org/10.1029/2000JD900343>
- Xiao, Q., McPherson, E. G., Ustin, S. L., Grismer, M. E., Simpson, J. R. (2000b). Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes*, 14(4), 763–784. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200003\)14:4<763::AID-HYP971>3.0.CO;2-7](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<763::AID-HYP971>3.0.CO;2-7)
- Zabret, K. (2013). The influence of tree characteristics on rainfall interception. *Acta Hydrotechnica*, 45(2013), 99–116.
- Zeng, N., Shuttleworth, J. W., Gash, J. H. C. (2000). Influence of Temporal Variability of Rainfall on Interception Loss . Part I . Point Analysis. *Journal of Hydrology*,

228, 228–241.

- Zhang, L., Dawes, W. R., Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37(3), 701–708. <http://doi.org/10.1029/2000WR900325>
- Zhang, Y., Chen, J. M., Miller, J. R. (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4), 166–181.
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.09.009>
- Zhang, Y., Wang, X., Hu, R., Pan, Y., Paradeloc, M. (2015). Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China. *Journal of Hydrology*, 527(0), 1084–1095. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.060>
- Zinke, P. J. (1967). Forest Interception Study in the United States. In *Forest Hydrology* (Eds.): Sopper, W. E. and Lull, H. W.. Pergamon, Oxford, PP. 137–161.

CAPÍTULO 7

ANEJOS

7. ANEJOS

Anejo 7.1. Valores de las medidas de precipitación, trascolación, escorrentía cortical e interceptación para el período de Abril de 2014 a Julio de 2015 en los individuos de *Pinus pinea* de la zona antropizada

DATE	P _{antrop} (mm)	P _{A1}			P _{A2}		
		Throughfall	Stemflow	Interception	Throughfall	Stemflow	Interception
01/04/2014	44,5	33,4		11,0	31,3		13,2
09/04/2014	34,3	24,7		9,6	22,7		11,6
23/04/2013	18,8	10,5		8,3	11,2		7,6
05/06/2014	14,7	7,2		7,5	7,7		7,1
18/09/2014	23,5	24,4		-0,9	24,0		-0,4
25/09/2014	37,4	34,8		2,6	32,0		5,3
01/10/2014	39,7	47,3		-7,6	41,7		-2,1
10/10/2014	10,5	9,1		1,4	7,1		3,3
16/10/2014	42,6	39,0		3,5	36,7		5,9
06/11/2014	14,8	20,9		-6,0	20,2		-5,4
13/11/2014	53,2	53,2		0,1	50,0		3,2
21/11/2014	25,5	15,8		9,7	17,2		8,3
26/11/2014	18,5	14,4		4,1	14,4		4,1
27/11/2014	16,9	17,6		-0,7	15,2		1,7
04/12/2014	57,5	51,5		6,0	53,1		4,4
18/12/2014	31,4	30,5		0,9	22,2		9,2
27/01/2015	23,0	19,3		3,7	15,5		7,5
04/02/2015	5,0	2,9		2,1	3,1		1,9
18/03/2015	8,1	4,4	0,0	3,7	5,1	0,0	3,0
26/03/2015	26,3	13,9	0,0	12,4	14,2	0,0	12,1
09/04/2015	18,7	13,0	0,0	5,7	11,8	0,0	6,9
28/04/2015	11,0	1,2	0,0	9,8	1,8	0,0	9,2
23/06/2015	4,8	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	4,8

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

DATE	P _{antrop} (mm)	P _{A3}			P _{A4}		
		Throughfall	Stemflow	Interception	Throughfall	Stemflow	Interception
01/04/2014	44,5	24,0		20,5	16,2		28,2
09/04/2014	34,3	17,5		16,8	12,2		22,1
23/04/2013	18,8	6,7		12,1	6,0		12,8
05/06/2014	14,7	6,6		8,1	5,3		9,4
18/09/2014	23,5	28,2		-4,7	25,7		-2,1
25/09/2014	37,4	36,6		0,8	42,3		-4,9
01/10/2014	39,7	44,0		-4,4	47,1		-7,5
10/10/2014	10,5	7,3		3,2	9,4		1,1
16/10/2014	42,6	34,2		8,4	45,4		-2,8
06/11/2014	14,8	19,4		-4,6	22,5		-7,7
13/11/2014	53,2	41,1		12,1	56,9		-3,7
21/11/2014	25,5	15,2		10,3	17,0		8,5
26/11/2014	18,5	12,8		5,7	14,3		4,2
27/11/2014	16,9	17,3		-0,4	13,6		3,3
04/12/2014	57,5	54,5		3,0	43,3		14,2
18/12/2014	31,4	32,1		-0,7	17,8		13,6
27/01/2015	23,0	21,6		1,4	19,8		3,3
04/02/2015	5,0	3,4		1,6	3,4		1,6
18/03/2015	8,1	5,5	0,0	2,6	5,2	0,0	2,9
26/03/2015	26,3	13,5	0,0	12,8	16,7	0,0	9,6
09/04/2015	18,7	8,7	0,0	9,9	11,3	0,0	7,4
28/04/2015	11,0	0,8	0,0	10,2	2,0	0,0	9,0
23/06/2015	4,8	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	4,8

7. Anejos

DATE	P _{antrop} (mm)	P _{A5}			P _{A6}		
		Throughfall	Stemflow	Interception	Throughfall	Stemflow	Interception
01/04/2014	44,5	25,9		18,6			
09/04/2014	34,3	16,5		17,8			
23/04/2013	18,8	7,7		11,1	4,8		14,0
05/06/2014	14,7	8,6		6,1	6,0		8,7
18/09/2014	23,5	22,3		1,3	22,3		1,2
25/09/2014	37,4	34,6		2,7	32,2		5,2
01/10/2014	39,7	49,7		-10,0	39,8		-0,1
10/10/2014	10,5	8,1		2,4	7,3		3,1
16/10/2014	42,6	37,7		4,9	33,6		8,9
06/11/2014	14,8	26,9		-12,1	17,8		-3,0
13/11/2014	53,2	57,0		-3,7	51,4		1,8
21/11/2014	25,5	14,0		11,5	21,7		3,8
26/11/2014	18,5	15,7		2,8	15,0		3,5
27/11/2014	16,9	18,2		-1,3	19,0		-2,1
04/12/2014	57,5	53,4		4,1	50,8		6,7
18/12/2014	31,4	32,3		-0,9	37,3		-5,9
27/01/2015	23,0	17,1		5,9	26,3		-3,3
04/02/2015	5,0	3,7		1,3	4,7		0,3
18/03/2015	8,1	3,7		4,4	5,4		2,7
26/03/2015	26,3	9,3		17,0	12,2		14,1
09/04/2015	18,7	8,1		10,6	7,9		10,8
28/04/2015	11,0	1,1		9,9	1,1		9,9
23/06/2015	4,8	0,0		4,8	0,0		4,8

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

DATE	P _{antrop} (mm)	P _{A7}			P _{A8}		
		Throughfall	Stemflow	Interception	Throughfall	Stemflow	Interception
01/04/2014	44,5						
09/04/2014	34,3						
23/04/2013	18,8				5,9		12,9
05/06/2014	14,7	7,9		6,8	4,2		10,5
18/09/2014	23,5	23,6		0,0	19,9		3,6
25/09/2014	37,4	35,5		1,9	27,5		9,9
01/10/2014	39,7	45,3		-5,7	34,7		5,0
10/10/2014	10,5	9,0		1,5	6,1		4,4
16/10/2014	42,6	50,7		-8,1	25,1		17,5
06/11/2014	14,8	16,2		-1,3	16,3		-1,4
13/11/2014	53,2	44,7		8,5	35,1		18,1
21/11/2014	25,5	18,4		7,1	12,7		12,8
26/11/2014	18,5	13,4		5,1	10,7		7,8
27/11/2014	16,9	15,2		1,7	15,5		1,4
04/12/2014	57,5	46,3		11,2	42,5		15,0
18/12/2014	31,4	29,0		2,4	27,5		3,9
27/01/2015	23,0	19,9		3,1	17,7		5,3
04/02/2015	5,0	3,5		1,5	3,2		1,8
18/03/2015	8,1	3,8		4,3	3,8		4,3
26/03/2015	26,3	11,4		14,9	11,0		15,3
09/04/2015	18,7	10,6		8,1	15,3		3,4
28/04/2015	11,0	0,6		10,4	1,3		9,7
23/06/2015	4,8	0,0		4,8	0,0		4,8

7. Anejos

Anejo 7.2. Valores de las medidas de precipitación, trascolación, escorrentía cortical e interceptación para el período de Noviembre de 2010 a Julio de 2015 en los individuos de *Pinus pinea* de la zona del Arroyo Los Morales

DATE	P _{est} (mm)	P _{M1}			P _{M2}		
		Throughfall	Stemflow	Interception	Throughfall	Stemflow	Interception
11/11/2010	13,0				10,2	0,0	2,8
16/11/2010	16,0				14,2	0,1	1,8
19/11/2010	5,8	3,9	0,0	1,8	3,1	0,0	2,7
25/11/2010	22,8				19,8	0,1	3,0
09/12/2010	180,6				148,4	0,7	31,4
23/12/2010	134,8				116,4	0,9	17,5
28/12/2010	1,2	0,2	0,0	1,0	0,5	0,0	0,7
18/02/2011	52,2				41,4	0,2	10,6
07/03/2011	5,2	1,3	0,0	3,9	1,6	0,0	3,6
16/03/2011	49,8				34,9	0,1	14,8
01/04/2011	2,8	2,1	0,0	0,7	2,4	0,0	0,4
13/04/2011	11,8				7,8	0,0	3,9
26/04/2011	63,4				38,7	0,1	24,5
04/05/2011	25,8	13,8	0,0	11,9	15,9	0,0	9,9
20/05/2011	25,8	20,1	0,1	5,6	24,2	0,1	1,5
09/06/2011	29,6						
07/09/2011	52,2	24,6	0,1	27,6	29,3	0,1	22,8
28/10/2011	63,4				51,4	0,3	11,7
04/11/2011	45,6				36,4	0,2	9,0
16/11/2011	26,2	8,1	0,0	18,1	8,7	0,0	17,5
21/11/2011	13,2	7,1	0,0	6,1	8,0	0,0	5,2
13/12/2011	6,4	0,6	0,0	5,8	1,3	0,0	5,1
17/01/2012	13,0	7,0	0,0	6,0	7,4	0,0	5,6
06/02/2012	2,6	0,1	0,0	2,5	0,3	0,0	2,3
22/03/2012	7,2	2,9	0,0	4,3	3,2	0,0	4,0
25/04/2012	41,6	13,5	0,0	28,1	17,0	0,0	24,5
08/05/2012	66,4	15,5	0,2	50,7	47,9	0,2	18,3
25/05/2012	26,4	8,4	0,0	18,0	12,9	0,0	13,5
02/10/2012	105,0				99,6	0,3	5,1
02/11/2012	55,2	26,6	0,1	28,5	37,2	0,1	17,9
05/11/2012	42,4	15,4	0,2	26,8	35,0	0,2	7,3
12/11/2012	38,4	14,8	0,1	23,4	26,9	0,1	11,4
19/11/2012	64,6	10,5	0,4	53,7	55,9	0,4	8,4
23/11/2012	7,4	4,8	0,0	2,6	5,3	0,0	2,1
03/12/2012	1,6	0,3	0,0	1,3	0,7	0,0	0,9
10/12/2012	9,6	2,1	0,0	7,5	4,7	0,0	4,9
18/12/2012	26,2	8,0	0,1	18,1	22,4	0,1	3,7
10/01/2013	12,8	3,6	0,0	9,2	6,1	0,0	6,7
15/01/2013	2,2	0,2	0,0	2,0	1,1	0,0	1,1
30/01/2013	45,4	11,2	0,2	34,0	29,0	0,2	16,2
20/02/2013	41,4	8,0	0,2	33,3	30,3	0,2	11,0
27/02/2013	21,0	6,3	0,0	14,7	11,0	0,0	9,9
14/03/2013	140,2	18,1	0,4	121,7	93,1	0,5	46,6
25/03/2013	57,2	8,1	0,1	49,1	31,9	0,1	25,2
02/04/2013	44,4	6,9	0,1	37,4	33,5	0,1	10,8
08/04/2013	18,2	5,8	0,0	12,4	10,4	0,0	7,8
02/05/2013	11,6	4,6	0,0	7,0	11,7	0,0	-0,2
22/05/2013	20,6	5,2	0,0	15,4	11,3	0,0	9,3
20/06/2013	15,0	1,6	0,0	13,4	5,7	0,0	9,3

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

DATE	P _{est} (mm)	P _{M1}			P _{M2}		
		Throughfall	Stemflow	Interception	Throughfall	Stemflow	Interception
09/10/2013	26,0	4,9	0,0	21,1	6,8	0,0	19,2
18/11/2013	2,8	0,6	0,0	2,2	0,8	0,0	2,0
26/11/2013	3,0	0,4	0,0	2,6	0,6	0,0	2,4
20/12/2013	12,0	8,3	0,0	3,7	7,6	0,0	4,4
03/01/2014	58,4	45,9	0,1	12,3	44,3	0,3	13,8
10/01/2014	5,6	1,9	0,0	3,7	1,7	0,0	3,9
20/01/2014	33,8	21,6	0,0	12,2	20,2	0,1	13,5
24/01/2014	20,0	18,2	0,0	1,8	16,0	0,1	3,8
07/02/2014	28,8	12,7	0,0	16,1	11,4	0,0	17,3
20/02/2014	29,6	12,8	0,0	16,8	12,8	0,0	16,8
06/03/2014	10,8	1,8	0,0	9,0	2,4	0,0	8,4
01/04/2014	47,6	31,3	0,0	16,2	30,8	0,2	16,6
09/04/2014	35,0	19,5	0,0	15,5	18,8	0,0	16,2
23/04/2013	20,2	10,3	0,0	9,9	11,4	0,0	8,8
05/06/2014	15,8	6,5	0,0	9,3	7,1	0,0	8,7
25/06/2014	3,2	0,9	0,0	2,3	1,4	0,0	1,8
18/09/2014	25,7	20,8	0,0	4,9	22,0	0,1	3,6
25/09/2014	35,4	24,8	0,0	10,5	25,0	0,1	10,3
01/10/2014	40,2	35,4	0,1	4,7	33,8	0,2	6,1
10/10/2014	9,9	6,6	0,0	3,3	6,4	0,0	3,5
16/10/2014	40,7	31,0	0,1	9,7	29,9	0,1	10,7
06/11/2014	14,2	11,6	0,0	2,6	11,2	0,0	3,0
13/11/2014	49,7	46,4	0,1	3,2	42,3	0,1	7,3
21/11/2014	23,5	17,4	0,0	6,0	16,7	0,1	6,7
26/11/2014	15,9	9,7	0,0	6,2	10,1	0,0	5,8
27/11/2014	18,6	13,2	0,0	5,4	13,5	0,0	5,1
04/12/2014	48,8	45,7	0,1	2,9	42,1	0,3	6,4
18/12/2014	29,9	26,6	0,1	3,3	26,2	0,2	3,5
27/01/2015	22,8	17,3	0,0	5,5	15,5	0,0	7,2
04/02/2015	6,0	1,8	0,0	4,2	2,8	0,0	-2,8
19/02/2015	6,7	1,6	0,0	5,1	2,0	0,0	-2,0
18/03/2015	6,4	4,8	0,0	1,6	5,2	0,0	-5,2
26/03/2015	24,3	14,5	0,0	9,8	14,3	0,0	-14,3
09/04/2015	13,0	11,4	0,0	1,5	11,4	0,0	-11,5
14/04/2015	1,2	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0
28/04/2015	8,4	1,1	0,0	7,3	2,2	0,0	-2,2
04/06/2015	0,8	0,0	0,0	0,8	0,1	0,0	-0,1
23/06/2015	5,0	0,3	0,0	4,7	0,8	0,0	-0,8

7. Anejos

Anejo 7.3. Valores de las medidas de precipitación, trascolación, escorrentía cortical e interceptación para el período de Noviembre de 2010 a Julio de 2015 en *Cistus ladanifer*

DATE	P _{est} (mm)	J1		
		Throughfall	Stemflow	Interception
11/11/2010	13,0			
16/11/2010	16,0			
19/11/2010	5,8	4,2	0,8	0,7
25/11/2010	22,8	17,4	3,8	1,6
09/12/2010	180,6			
23/12/2010	134,8			
28/12/2010	1,2	0,2	0,0	1,0
18/02/2011	52,2			
07/03/2011	5,2			
16/03/2011	49,8	38,0	7,4	4,4
01/04/2011	2,8	1,9	0,4	0,4
13/04/2011	11,8	8,6	2,1	1,1
26/04/2011	63,4	46,4	11,3	5,7
04/05/2011	25,8	15,3	4,7	5,8
20/05/2011	25,8	19,3	6,4	0,1
09/06/2011	29,6	18,0	7,5	4,1
07/09/2011	52,2	35,6	9,0	7,6
28/10/2011	63,4	40,4	12,0	10,9
04/11/2011	45,6	35,2	4,1	6,3
16/11/2011	26,2	8,0	2,9	15,3
21/11/2011	13,2	7,1	2,1	4,0
13/12/2011	6,4	1,3	0,4	4,7
17/01/2012	13,0	4,7	2,4	5,9
06/02/2012	2,6	0,0	0,0	2,6
22/03/2012	7,2	3,6	1,4	2,2
25/04/2012	41,6	24,0	5,8	11,8
08/05/2012	66,4			
25/05/2012	26,4	15,4	5,1	5,9
02/10/2012	105,0			
02/11/2012	55,2	37,8	11,3	6,2
05/11/2012	42,4	32,4	8,8	1,2
12/11/2012	38,4	26,8	6,7	4,9
19/11/2012	64,6			
23/11/2012	7,4	4,4	1,5	1,5
03/12/2012	1,6	0,4	0,0	1,2
10/12/2012	9,6	6,1	1,4	2,1
18/12/2012	26,2	20,5	3,6	2,1
10/01/2013	12,8	6,3	1,3	5,2
15/01/2013	2,2	1,1	0,0	1,0
30/01/2013	45,4	29,2	6,7	9,6
20/02/2013	41,4	31,3	6,9	3,3
27/02/2013	21,0	15,8	2,7	2,5
14/03/2013	140,2			
25/03/2013	57,2	42,7	8,8	5,7
02/04/2013	44,4	30,5	7,5	6,4
08/04/2013	18,2	11,8	2,6	3,8
02/05/2013	11,6	8,4	1,4	1,9
22/05/2013	20,6	11,2	2,6	6,8
20/06/2013	15,0	9,2	1,4	4,4

**Modelación de la interceptación en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*:
Efecto de diferentes parámetros climáticos y de vegetación**

DATE	P _{est} (mm)	J1		
		Throughfall	Stemflow	Interception
09/10/2013	26,0	21,6	3,2	1,2
18/11/2013	2,8	0,8	0,3	1,7
26/11/2013	3,0	0,7	0,2	2,1
20/12/2013	12,0	6,9	2,6	2,6
03/01/2014	58,4	40,8	15,0	2,6
10/01/2014	5,6	0,6	0,6	4,4
20/01/2014	33,8			
24/01/2014	20,0	15,3	4,6	0,0
07/02/2014	28,8	16,7	4,3	7,8
20/02/2014	29,6	20,0	4,6	5,0
06/03/2014	10,8	4,0	0,5	6,3
01/04/2014	47,6	31,6	8,0	7,9
09/04/2014	35,0	20,3	5,4	9,4
23/04/2013	20,2	11,6	3,0	5,6
05/06/2014	15,8	9,9	2,0	3,9
25/06/2014	3,2	2,3	0,3	0,6
18/09/2014	25,7	19,2	3,2	3,3
25/09/2014	35,4	28,4	6,7	0,3
01/10/2014	40,2	33,0	7,2	0,0
10/10/2014	9,9	6,2	2,5	1,2
16/10/2014	40,7	30,5	7,0	3,3
06/11/2014	14,2	10,6	3,5	0,2
13/11/2014	49,7	34,2	10,5	5,0
21/11/2014	23,5	17,3	4,3	1,9
26/11/2014	15,9	9,6	1,5	4,8
27/11/2014	18,6	12,9	2,3	3,4
04/12/2014	48,8			
18/12/2014	29,9	23,2	5,4	1,3
27/01/2015	22,8	17,7	3,1	2,0

DATE	P _{est} (mm)	J2		
		Throughfall	Stemflow	Interception
19/02/2015	6.7	2.6	0.0	4.1
18/03/2015	6.4	2.9	0.2	3.3
26/03/2015	24.3	13.4	0.2	10.7
09/04/2015	13.0	6.4	0.5	6.1
14/04/2015	1.2	0.6	0.0	0.6
28/04/2015	8.4	2.0	0.1	6.4
04/06/2015	0.8			
12/06/2015	3.9	0.0	0.0	3.9
23/06/2015	5.0	0.0	0.0	5.0

Anejo 7.4. Artículo publicado en la Revista Ingeniería del Agua

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.^{*1}, Moreno-Pérez, M.F.^{**2} y Roldán-Cañas, J.^{**3}

^{*}Departamento de Agronomía, Área de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo da Vinci, 14071 Córdoba, E-mail: ^{*1}g82peam@uco.es, ^{**2}mfaíma@uco.es, ^{**3}jroldan@uco.es

Recibido: 22/02/2016

Aceptado: 25/04/2016

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 Gabril" (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 Gabril" (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*.