

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Trabajo fin de máster tipo B

Aproximación al ciclo hidrológico de una masa de *Pinus halepensis* con diferentes grados de cobertura vegetal

Alumno: Antonio Molina Herrera

Director: Antonio D. del Campo García

Diciembre 2010

ÍNDICE

1. Introducción y objetivos	11
1.1. El papel del bosque en el ciclo hidrológico	15
1.2. Antecedentes en la “selvicultura hidrológica”	20
1.3. Contextualización del trabajo	22
2. Materiales y métodos	23
2.1. Sitio de estudio	23
2.2. Diseño del experimento, aplicación de los tratamientos y caracterización de la masa residual.....	29
2.3. Componentes del ciclo hidrológico	33
2.3.A. Cómputo de la precipitación exterior y variables meteorológicas complementarias (humedad y temperatura ambiente).....	33
2.3.B. Trascalación, escorrentía cortical e interceptación.....	35
2.3.C. Contenido de humedad del suelo.....	39
2.3.D. Transpiración.....	43
2.4. Tratamiento y análisis estadístico de los datos.....	47
3. Resultados y discusión	49
3.1. Precipitación incidente y su partición: trascolación, escorrentía cortical e interceptación	49
3.2. Transpiración	60
3.3. Contenido de humedad del suelo	66
3.4. Modelación simple de las relaciones hidrológicas bosque-agua	70
4. Conclusiones e implicaciones futuras	75
5. Referencias bibliográficas	77
6. Anejos	83
6.1. Datos complementarios	83
6.2. Resultados estadísticos.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación de la cobertura de matorral con la erosión y la interceptación en la región de Murcia. El óptimo de cobertura vegetal estaría entre el 58 y el 64 % según pendiente (en ningún caso las pérdidas de suelo pasan de 1 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹). Tomado de Belmonte Serrato et al. (1999).....	13
Figura 2. Esquema del ciclo hidrológico de una masa forestal (Tomado de Bonan, 2008).....	15
Figura 3. Relación entre la trascolación y la precipitación según una zona con tratamiento (círculos vacíos) y sin la aplicación de éste (círculos rellenos). Obsérvese como la relación trascolación versus precipitación se ha visto modificada con la aplicación del clareo	21
Figura 4. Transpiración media de los árboles según intensidad de clara (de Medhurst et al., 2002).....	22
Figura 5. Localización del sitio de estudio.....	24
Figura 6. Temperaturas máximas, medias y mínimas anuales (1960-1992).....	25
Figura 7. Precipitación anual (1960-1990) según año natural (izquierda) y año hidrológico (derecha).....	25
Figura 8. Precipitación media mensual (1960-1990).....	26
Figura 9. Vista aérea (MMARM, 2009) de los bloques (1, 2 y 3) o repeticiones y del tratamiento cortafuegos (CF)	30
Figura 10. Disposición de los recolectores de trascolación.....	36
Figura 11. Disposición de los anillos de recolección de escorrentía cortical	37
Figura 12. Representación esquemática de la distribución de los colectores debajo de la copa del árbol (círculos rellenos) en 6 ejes (18 colectores por árbol). Los ejes estaban separados cada 60 °: Los colectores se dispusieron con una distancia entre sí de 50 cm.....	39
Figura 13. Esquema del funcionamiento y estructura de los sensores de flujo de savia (de Manual ICT International). Los termopares exteriores están representados por las letras a y c y los interiores por b y d.	43
Figura 14. Detalle de la instalación de los sensores de flujo de savia en campo.....	45
Figura 15. Representación de la sección transversal de la inserción de un sensor de flujo de savia en un tronco. Se presentan cada par de termopares con líneas horizontales. A su vez, están representadas las áreas de cada par de termopares (área punteada para los externos, área vacía para los internos).....	46
Figura 16. Precipitación diaria (mm) durante el periodo de estudio. Las barras sin colorear representan los días no estudiados, mientras que aquellas coloreadas se corresponden con	

días dentro de las 6 semanas en estudio. Las marcas en el eje de abscisas están representadas cada 10 días.....	49
Figura 17. Trascolución media (% de la precipitación incidente) para cada tratamiento. Las barras de error representan la desviación típica. Se adjunta a su vez el resultado de las comparaciones post-hoc o a posteriori basadas en el test de Tukey a $p < 0,005$ (a ó b).....	51
Figura 18. Modelo potencial para la interceptación global (% de Pincid.), como función del Índice de Área Foliar de los tratamientos (n = 11).....	53
Figura 19. Interceptación semanal media (mm) de cada uno de los tratamientos, junto con la precipitación incidente. Los números representan el periodo semanal correspondiente (1 a 6).	55
Figura 20. Trascolución media (mm) de los árboles muestreados en los tratamientos 10 y CF (n= 4), según fecha: 01.06.09 (a), 05.06.09 (b), 22.10.09 (c), 02.12.09 (d) y 21.12.09 (e) y para todo el periodo de toma de datos como proporción de la precipitación (f). Se adjuntan además los valores y el resultado del análisis estadístico post-hoc para todo el periodo de toma de datos (letras a y b). Las barras de error representan la desviación estándar positiva.	58
Figura 21. Trascolución media (mm) a nivel de árbol para tratamiento 10 (círculo vacío) y tratamiento CF (círculo relleno) frente a la precipitación exterior (mm). A su vez, se adjuntan las rectas de regresión y sus ecuaciones (10: línea continua; CF: línea discontinua).....	59
Figura 22. Escorrentía cortical (% de la precipitación exterior) a nivel de árbol. Se adjuntan las barras de error en las semanas a partir de la corrección. A su vez, no se presenta la primera semana por suponer valores nulos para ambos tratamientos.....	60
Figura 23. Valores medios diarios para temperatura (°C), humedad relativa (proporción) y déficit de presión de vapor (mbar).....	61
Figura 24. Transpiración media a nivel de árbol ($m^3 \text{ día}^{-1}$) durante el periodo de estudio.....	62
Figura 25. Transpiración a nivel de masa (mm) durante el periodo de estudio.....	63
Figura 26. Transpiración de los árboles en el tratamiento 10 y CF.....	65
Figura 27. Flujo de savia medio diario (litros día^{-1}) \pm desviación estándar de los tratamientos 10 y CF. Las letras representan grupos con medias estadísticamente diferentes.	65
Figura 28. Velocidad de flujo de savia para los tratamientos 10 y CF.....	66
Figura 29. Rectas de calibración por defecto (negrita) para las sondas EC-TM (a) y EC-10 (b) y rectas modificadas (líneas con discontinuidad) según calibración de campo.....	67
Figura 30. Dinámica de la humedad del suelo diaria ($m^3 m^{-3}$) para 3 sondas seleccionadas para el tratamiento 100. Se presentan también las fechas (01.06.09, 05.08.09, 05.10.09) en	

las que se realizaron las comparaciones de medias entre los tratamientos (círculos rellenos).	67
Figura 31. Dinámica del contenido de humedad del suelo medio (mm) para los tratamientos	68
Figura 32. Dinámica del contenido de humedad medio (mm) para las sondas “bajo influencia de árbol” de los tratamientos.....	69
Figura 33. Dinámica del contenido de humedad del suelo medio (mm) para los tratamientos 10 y CF.....	70
Figura 34. Periodos desfavorables (0) y óptimos (1) para tratamiento 10 (A) y para tratamientos 60 y 100 (B). Los periodos sin número se corresponden con el periodo sin transpiración (2).	72
Figura 35. Periodos de transpiración para el tratamiento CF. Se presentan las dinámicas del contenido de humedad para 10 y CF.	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estadísticas correspondientes a los dos últimos inventarios forestales (IFN 2 e INF3) en la comunidad valenciana.....	12
Tabla 2. Valores medios (n = número de estudios) y su desviación estándar (SE) para la tracolación y escorrentía cortical (% de la precipitación) de varias especies mediterráneas. Tomado de Llorens y Domingo (2007).....	18
Tabla 3. Vegetación actual.....	28
Tabla 4. Caracterización selvícola de los tratamientos. N es la densidad de pies, D es el diámetro a la altura del pecho, G es el área basimétrica, FCC es la Fracción de Cobertura y LAI es el Índice de Área Foliar. Las mediciones del CF se corresponden con la unidad experimental, por lo que no se presentan estadísticos descriptivos. La unidad 30 del bloque 1 tuvo que ser descartada del estudio porque rachas de fuerte viento provocaron la caída de un gran número de pies.....	31
Tabla 5. Variables del árbol medio (entre paréntesis desviación estándar) de los tratamientos. Obsérvese que los árboles de los tratamientos 10 y CF tienen índices de competencia nulos.	33
Tabla 6. Resumen de los periodos semanales estudiados en la partición de la lluvia. N_{eventos} es el número de eventos producidos; V_{med} es el volumen medio de los eventos; $V_{\text{máx}}$ y $V_{\text{mín}}$ representan el máximo y el mínimo volumen de evento; I_{med} , $I_{\text{máx}}$ e $I_{\text{mín}}$ idéntico a los volúmenes pero referente a la intensidad; N_{oc} representa el porcentaje de lluvia recogida durante la noche (20 h-8 h).....	50
Tabla 7. Valores medios de escorrentía cortical por tratamiento (como % de la precipitación) junto con los coeficientes de variación (CV).....	52
Tabla 8. Resultados estadísticos de la interceptación semanal. Se presentan para cada semana las significancias estadísticas del test de Levene (Levene), del ANOVA (ANOVA), de las pruebas post-hoc (Post-hoc) y los grupos homogéneos resultantes de las pruebas post-hoc (Grupos homog.)	56
Tabla 9. Resultados del análisis de correlación de Pearson entre la transpiración (Q) de los árboles de cada tratamiento y el déficit de presión de vapor durante el verano (22 junio-31 agosto 09). Se presenta el valor medio y la desviación típica. Todos los casos resultaron muy significativos ($p < 0,01$). Téngase en cuenta que la velocidad del viento no se midió, de manera que ésta podría haber mejorado las correlaciones encontradas.....	62

Tabla 10. Transpiración total durante el periodo de estudio en lámina de agua (mm) y como porcentaje de la precipitación efectiva (% P.efectiva)	64
donde LAI es el índice de área foliar de las diferentes cubiertas forestales ($0 \leq \text{LAI} \leq 2,8$), convertible a cobertura según (Molina y del Campo, 2010, en revisión): $\text{LAI} = 0,0318 \text{ FCC}$ ($R^2 = 0,98$).....	70
Tabla 11. Trascolución semanal de cada uno de los tratamientos, ordenada cronológicamente (de la semana 1 a la 6).....	83
Tabla 12. Valores de escorrentía cortical de cada uno de los tratamientos en: volumen (l), mm (medio- Med.-, máximo –Máx.- y mínimo –Mín.-) y como % de la precipitación incidente según método aplicado. Las semanas están ordenadas cronológicamente (de la 1 a la 6) según orden de aparición.....	84

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Hoy en día siguen sin estar resueltos los conflictos que se derivan del uso del agua, conflictos que se producen a todas las escalas (dentro de un país, entre países,...) y con actores bien distintos según se consideren unas u otras. Un aspecto en el que sí existe consenso actual, es la evidencia de que el agua potable se está convirtiendo progresivamente en un recurso cada vez más escaso a medida que el planeta incrementa su densidad de población y los países desarrollados aumentan su ritmo de consumo (ONU, 2009; Vorosmarty *et al.*, 2000). Teniendo en cuenta sólo el desarrollo de la población y su economía, la mayor parte de la superficie terrestre en el año 2025 tendrá ratios de consumo versus escorrentía un 120 % superiores a los actuales (Vorosmarty *et al.*, 2000), lo que da una idea del impacto negativo de los ritmos de consumo y crecimiento de hoy en día. Cuando, además de tener en cuenta las proyecciones de desarrollo económico-social, se consideran los efectos previstos del cambio climático para la región mediterránea (IPCC, 2007) el panorama se hace más complejo (Vorosmarty *et al.*, 2000), más aún cuando en algunas cuencas de ésta existen ya déficits estructurales entre el consumo y la aportación específica (consumo neto de agua / total del recurso hídrico >1) (Estrela *et al.*, 2000). Esto último ha llevado asociado problemas de sobreexplotación (salinización, contaminación por nitratos...) en algunos acuíferos, con ejemplo claro el acuífero de la Mancha oriental de la CH del Júcar (Pimentel y Velázquez, 2008).

La percepción pública de la influencia de los bosques en el recurso agua es generalmente positiva, es decir, cuanto mayor sea la biomasa forestal más cantidad de agua está disponible para uso humano (Calder, 2002; 2003). Bien es cierto que los bosques generan una serie de beneficios para la sociedad tales como la protección frente a la erosión, la mejora de la calidad del agua, la prevención del aterramiento de embalses, etc. (Brooks *et al.*, 2003; Hewlett, 1982). Sin embargo, en lo que se refiere a la cantidad de agua o dicho de otra forma la aportación específica de las cuencas, existe una discrepancia clara entre la percepción pública y la evidencia científica (Calder, 2002; 2003), de manera que existen numerosos estudios que afirman que la aportación específica se reduce como consecuencia de la presencia de vegetación (Brooks *et al.*, 2003; Bosch y Hewlett, 1982; Hibbert *et al.*, 1982), con un mayor impacto si el recurso agua ya se encuentra bajo presión por otros factores (Van Dijk y Keenan, 2007). Sólo en situaciones muy concretas de captación de precipitación horizontal puede decirse que los bosques aumentan la escorrentía superficial (tales como algunas islas

o bosques templados de Sudamérica), haciendo que la capacidad de captación se incremente como consecuencia de la vegetación.

En lo que se refiere a nuestro país, a pesar de que la opinión pública crea que los bosques están reduciéndose en extensión (Fabra M., comunicación personal, 2010*), los resultados de los inventarios forestales revelan precisamente lo contrario, tal es el ejemplo en la Comunidad Valenciana (Tabla 1). En la tabla 1 se aprecia como el monte arbolado ha crecido en las tres provincias valencianas en el lapso de tiempo que transcurre entre los años 1994 y 2006, a expensas de una reducción de los bosques dispersos. La densificación o expansión de los bosques se viene produciendo en nuestro país desde los años 60, debido principalmente a dos factores fundamentales: cambios socioeconómicos que provocaron movimientos migratorios a las ciudades por parte de la sociedad rural (descenso de los usos del bosque: carbón, ganadería, etc.) y políticas de gestión forestal encaminadas a la repoblación como arma para la lucha contra la desertificación (por ejemplo, proyectos enmarcados en el Plan “Lucdeme”).

Tabla 1. Estadísticas correspondientes a los dos últimos inventarios forestales (IFN 2 e INF3) en la comunidad valenciana

PROVINCIA	Año del inventario	SUPERFICIES (ha)		Total monte arbolado	Monte desarbolado	Total de uso forestal	Total de uso no forestal	Total provincial
		Monte arbolado no adherado	Monte arbolado ralo y disperso					
Alicante								
IFN3	2006	112 895	19 891	132 786	117 534	250 320	331 338	581 658
IFN2	1994	61 532	26 874	88 406	158 969	247 375	334 340	581 715
Castellón								
IFN3	2006	248 576	22 142	270 718	152 395	423 113	240 072	663 185
IFN2	1994	147 784	50 207	197 991	201 158	399 149	267 077	666 226
Valencia								
IFN3	2006	318 598	32 357	350 955	230 950	581 905	498 704	1 080 609
IFN2	1994	283 860	58 022	341 882	226 671	568 553	509 015	1 077 567
Comunidad.								
IFN3	2006	680 069	74 390	754 459	500 879	1 255 338	1 070 114	2 325 452
IFN2	1994	493 176	135 103	628 279	586 798	1 215 077	1 110 432	2 325 508

En este contexto, si bien es cierto que altas densidades de vegetación generan un rango de beneficios los cuales ya han sido comentados, se observan otros efectos negativos como son la homogeneidad de la masa frente a perturbaciones externas (plagas y enfermedades), la continuidad de combustible (Vélez, 1990) y la disminución de la aportación específica de las cuencas hidrológicas. En relación a este último, en un estudio en la cabecera del alto Ebro (Gallart y Llorens, 2003), se estimó que la expansión y densificación del bosque fue responsable de un decrecimiento en la descarga media del río de un 17 a un 46 % en los últimos 50-60 años.

* Profesor de la Universidad Politécnica de Valencia. Actualmente está llevando a cabo un estudio en nuestro país acerca de la percepción social del bosque y la influencia de la gestión forestal.

La gestión forestal debe de estar encaminada a aportar el mayor rango de beneficios posibles para la sociedad, compatibilizando usos y apoyándose en un manejo integrado (Kimmins, 2004). En España, la gestión de los montes está decreciendo, tal y como se recoge en las estadísticas oficiales del MMARM (2006), donde se aprecia una reducción en el volumen de cortas con respecto al año 1990 de un 60 % a un 38 %. Dicho descenso se asocia principalmente a la función protectora que tiene la vegetación frente a la erosión y a la falta de competitividad que tienen nuestros productos forestales en el mercado actual (Scarascia-Mugnozza et al., 2000). Sin embargo, tal y como se comentó anteriormente, existen otros efectos colaterales negativos de dicha falta de gestión. En este sentido, una gestión que integre las diversas funciones del bosque parece la opción más adecuada, con mayor urgencia en las zonas donde exista ya un déficit estructural del recurso agua y los efectos previstos del cambio climático sean negativos. Estamos por tanto ante un enfoque de silvicultura adaptativa en regiones especialmente vulnerables al cambio climático, tales como la mediterránea (Kimmins, 2004). Un ejemplo de dicho manejo integrado podría ser el que se muestra en la Figura 1, donde se presenta cual sería la cobertura óptima para equilibrar las pérdidas de agua por interceptación con las pérdidas de suelo en una cubierta de matorral mediterráneo (Belmonte Serrato et al., 1999).

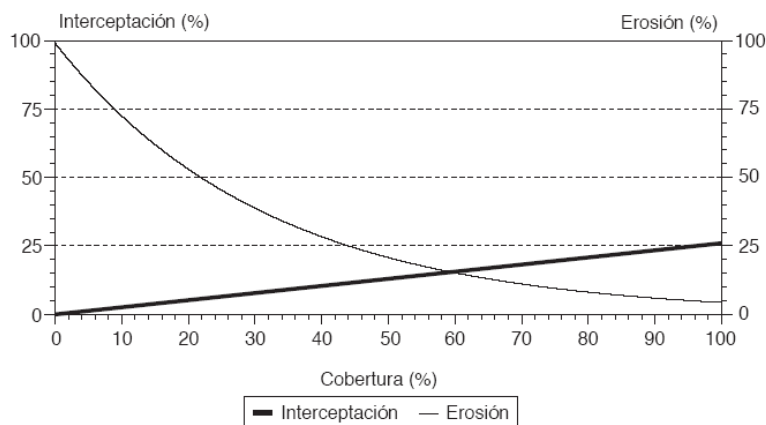


Figura 1. Relación de la cobertura de matorral con la erosión y la interceptación en la región de Murcia. El óptimo de cobertura vegetal estaría entre el 58 y el 64 % según pendiente (en ningún caso las pérdidas de suelo pasan de 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹). Tomado de Belmonte Serrato et al. (1999)

En la línea de argumentar una gestión integrada del bosque mediterráneo, el presente trabajo trata de cuantificar el efecto que tiene la silvicultura (a través de claras a varias intensidades) sobre los componentes del ciclo hidrológico a escala de parcela en repoblaciones de *Pinus halepensis* Mill. Dichas repoblaciones se llevaron a cabo alrededor de los años 1950 con

objeto de frenar la erosión (carácter protector). Actualmente, su crecimiento deficiente y su alta densidad de individuos son el resultado de una nula gestión a lo largo de sus aproximadamente sesenta años de vida.

Los objetivos generales del presente estudio son:

- Estudiar la influencia de la intensidad de clara sobre la hidrología de una masa coetánea de *Pinus halepensis* Mill. un año después de su aplicación (**escala masa**).
- Estudiar la variación de los componentes del ciclo hidrológico entre la aplicación de los tratamientos (copas claras) y la reconfiguración de la copa del árbol (consecuencia de la dinámica de la masa) (**escala árbol**).
- Presentar modelos simples que sirvan para describir los procesos hidrológicos en los dos casos anteriores.
- Realizar un primer análisis de los datos que posteriormente integrarán una tesis doctoral.

Para la consecución de estos objetivos, se hace necesaria la medición y/o estimación de los siguientes componentes del ciclo hidrológico (objetivos específicos):

- Trascolución, escorrentía cortical e interceptación
- Transpiración
- Dinámica del contenido de humedad del suelo

1.1. El papel del bosque en el ciclo hidrológico

De la cantidad de agua total presente en nuestro planeta, un 2,6 % es agua dulce. El 77 % del agua dulce se concentra en los casquetes polares y un 11 % en acuíferos profundos, quedando el resto como flujos de agua movidos por la energía del sol en lo que se conoce como ciclo hidrológico (Brooks et al., 2003). En la figura 2 se presenta un esquema de lo que podría ser el ciclo hidrológico en una masa forestal, gobernado por los procesos que se especifican a continuación (adaptado de Savé et al., 2005):

$$P_g = I_t + Esc + ET_r \pm \Delta S$$

donde: P_g es la precipitación o entrada de agua al sistema; I_t es la interceptación, entendida como la cantidad de agua evaporada a la atmósfera desde la superficie de la vegetación; Esc corresponde a la fracción de la precipitación que genera las escorrentías superficiales, subsuperficiales y subterráneas; ET_r representa la evapotranspiración real, entendida como la suma del agua evaporada desde la superficie del suelo y el agua que transpira la vegetación y ΔS representa la variación el contenido de humedad del suelo y las capas freáticas

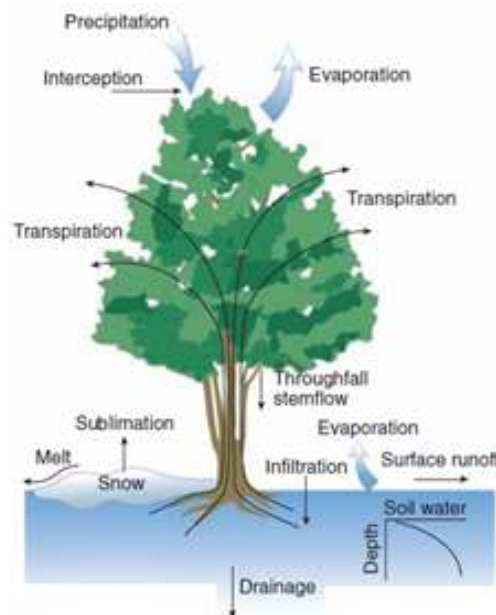


Figura 2. Esquema del ciclo hidrológico de una masa forestal (Tomado de Bonan, 2008).

El bosque puede afectar en mayor o menor medida a los flujos que se dan en el balance, dependiendo de las características climáticas de la zona y de las características estructurales y fisiológicas de la estructura forestal. A continuación, se presenta el papel que puede jugar el bosque en algunos de ellos.

Precipitación o Entrada de agua al sistema forestal

En lo que se refiere a la entrada de agua al sistema o precipitación, el bosque sólo tendrá efecto en el caso de que exista un flujo cuantitativamente importante asociado a nieblas (precipitación horizontal), las cuales serán más fácilmente captadas si existe vegetación, ya que se produce un aumento de la superficie útil de captación y una mayor condensación por agregado de las gotitas a gotas más grandes (Brooks et al., 2003). Por poner un ejemplo, en un estudio en las Islas Canarias de la influencia del clareo 9 años después de la aplicación en una masas de *Pinus canariensis*, Aboal et al. (2000) encontraron que bajo las masas (al nivel del suelo) más densas se concentraron las mayores cantidades de agua. Este resultado lo asociaron a que precisamente las nieblas fueron mejor captadas en las zonas con más biomasa forestal.

Intercepción

La intercepción es el proceso por el cual el agua de lluvia que es retenida en la cubierta forestal es enviada de nuevo a la atmósfera vía evaporación (Martínez de Azagra y Hevia, 1996). La intercepción depende principalmente de las características climáticas y de la cubierta forestal, de manera que los factores que principalmente afectan pueden agruparse de la siguiente forma (Crockford y Richardson, 2001):

- Precipitación (intensidad, cantidad, duración)
- Velocidad del viento y dirección
- Temperatura del aire
- Humedad de la atmósfera
- Especie (tamaño y rugosidad de sus hojas, ángulo de inserción de las hojas, corteza, ramificación, etc.)
- Capacidad de almacenamiento de la cubierta (S)

Actualmente existen varios modelos para su estimación (véase revisión de Muzylo et al., 2009) en los cuales se tienen en cuenta en mayor o menor medida los factores que se han enumerado (Gash et al., 1995; Calder, 1986; Gash, 1979). La gran mayoría de modelos físicamente basados parten de la idea inicial de Horton (1919), donde se considera la interceptación como la suma de la evaporación de agua durante la lluvia ($e \cdot t$) y la capacidad de saturación del dosel (S), asumiendo que la vegetación se comporta como un recipiente capaz de albergar una cantidad máxima de agua:

$$I_T = e \cdot t + S$$

donde I_T es la interceptación; e es el ratio de evaporación durante la lluvia; t es la duración del aguacero y S es la capacidad de saturación del dosel (cantidad máxima de agua que puede albergar el dosel)

Para regiones climáticas similares, la interceptación variará de acuerdo a los factores dependientes de la vegetación, esto es, especie y capacidad de saturación, de manera que suele asumirse un ratio de evaporación durante la lluvia similar entre las diferentes comunidades vegetales (Valente et al., 1997), a pesar de que existen autores que evidencian que esto puede traer errores importantes en el cálculo de la interceptación (Herbst et al., 2008).

En el mediterráneo, el ratio de evaporación durante la lluvia suele ser muy importante debido a que las condiciones de sequedad ambiental son comunes. Llorens et al. (1997) estudiaron la interceptación para una masa de *Pinus sylvestris* (2400 pies/ha, área basimétrica de 39.5 m²/ha) ubicada en el Pirineo oriental, encontrando que la interceptación (como % de la precipitación) más elevada se dio para aguaceros de intensidad baja, duración media y condiciones atmosféricas secas. Esto último pone de manifiesto la importancia de este componente en dicha región. Por otro lado, en lo que se refiere a las diferencias entre especies mediterráneas, las coníferas suelen interceptar mayor cantidad que las frondosas (Llorens y Domingo, 2007), dando en algunos casos casi el doble de diferencia (*Pinus pinaster* versus *Eucaliptus .globulus*; Valente et al., 1997). En el trabajo de Llorens y Domingo (2007), se revisan gran parte de los estudios de partición de la lluvia llevados a cabo en el mediterráneo europeo, de manera que representa una buena aproximación para conocer la interceptación por especie en nuestra región (Tabla 2).

Tabla 2. Valores medios (n = número de estudios) y su desviación estándar (SE) para la trascolación y escorrentía cortical (% de la precipitación) de varias especies mediterráneas. Tomado de Llorens y Domingo (2007).

Especie	Trascolación				Escorrentía cortical			
	n	Media	SE	CV %	n	Media	SE	CV %
<i>A. alba</i>	3	71.1	4.66	11.3				
<i>A. abies</i>	5	79.6	1.19	3.4	1	0.7		
<i>P. halepensis</i>	1	70.7			1	1.7		
<i>P. nigra</i>	2	76.6	7.66	14.1	1	12.3		
<i>P. pinaster</i>	2	85.4	0.55	0.9	2	1.3	0.20	21.8
<i>P. pinea</i>	1	69.9			1	1.7		
<i>P. sylvestris</i>	2	79.0	4.19	7.5	2	0.8	0.52	93.1
<i>Q. cerris</i>	3	87.2	1.39	2.8	2	6.8	3.62	75.7
<i>Q. ilex</i>	4	72.2	3.22	8.9	4	4.2	2.70	128.9
<i>Q. petraea</i>	1	88.0			1	4.8		
<i>Q. pyrenaica</i>	4	84.8	0.53	1.2	3	0.8	0.29	60.5
<i>E. globulus</i>	3	84.8	0.52	1.1	3	2.9		
<i>F. sylvatica</i>	4	72.8	2.83	7.8	3	3.1	1.64	90.4

Dentro de una misma especie, la diferencia en la interceptación vendrá dada por las características estructurales de la masa y las condiciones ambientales (Crockford y Richardson, 2001). Para un aguacero y masa dada, la interceptación puede calcularse de la siguiente forma indirecta (Savé et al, 2005):

$$I_t = P_g - (T_d + T_i + E_f)$$

Donde I_t es la interceptación, P_g es la precipitación incidente o exterior, T_d es la trascolación directa o sin contacto con el dosel, T_i es la trascolación indirecta y E_f es el escurrimiento cortical o fustal

De acuerdo a esta ecuación, a medida que aumente el porcentaje de huecos mayor será la trascolación directa y por tanto menor la interceptación. A su vez, dos masas de una misma especie con idéntico porcentaje de huecos pueden presentar diferentes interceptaciones como consecuencia de una estratificación vertical diferente.

Evapotranspiración

La presencia de bosque modifica los patrones de la escorrentía de una cuenca, de manera que suele mejorar las propiedades físicas del suelo, haciendo que éste tenga una mayor capacidad de infiltración (Hewlett et al., 1982). Sin embargo, mediante los procesos de evapotranspiración las reservas de agua del suelo se modifican, de manera que los patrones de escorrentía también se ven influidos en este sentido (Brooks et al., 2003; Zhang et al., 2001).

Según la definición adoptada en este trabajo (página 15), la evapotranspiración comprende dos procesos fundamentales (suelen estudiarse conjuntamente por la complejidad que supone su medición por separado): a) evaporación del agua desde los estratos superficiales del suelo y b) transpiración del agua de capas profundas o semiprofundas por parte de la vegetación. En regiones húmedas, la evapotranspiración suele tener un valor cercano al 70 % de la precipitación, mientras que en regiones más secas o áridas, este valor suele ascender hasta casi el 100%, ya que en estos casos no suele existir limitación energética (Brooks et al., 2003; Zhang et al., 2001). Estos porcentajes dependen de la vegetación presente (especie, estructura, grado de madurez...), de manera que los ratios evaporación/transpiración serán diferentes según se encuentren unas comunidades vegetales u otras.

En lo que respecta a la transpiración (por ser uno de los componentes estudiados en este trabajo) en condiciones áridas (sin limitación de energía), se considera que los factores principales que afectan son: a) el agua disponible para uso por las plantas y b) la resistencia de la cubierta vegetal a las pérdidas de agua (Zhang et al., 2001).

En relación al primer factor (a), la aproximación que suele emplearse es que toda cantidad de agua en el suelo que se encuentre entre capacidad de campo (máximo) y punto de marchitez permanente (mínimo) es susceptible de ser utilizada por la cubierta vegetal (Larcher, 1977). Según esto, las plantas pueden absorber agua del suelo porque son capaces de competir con las fuerzas de cohesión (generalmente las fuerzas capilares suelen ser mucho mayores que el resto), de manera que cuando éstas sean mayores que las tensiones generadas por la raíz, la planta ya no será capaz de obtener más agua. Dicho esto, con agua disponible la planta actuará de igual forma que si de una superficie libre de agua se tratase (Larcher, 1977), con mayores pérdidas a la atmósfera a medida que el gradiente de vapor de agua entre la superficie de la hoja y la capa de aire en contacto con ésta sea mayor, o dicho de otro modo, el déficit de presión de vapor (Larcher, 1977).

En el segundo factor (b) se engloban todos los procesos fisiológicos que hacen que la transpiración no actúe de la misma forma que la evaporación directa desde una superficie libre, especialmente importantes en las plantas adaptadas al clima mediterráneo. La conducción del agua desde las raíces hasta las hojas describe un camino lleno de obstáculos, con el grado de apertura de estomas como última barrera. De esta manera, las plantas son capaces de regular sus pérdidas de agua según consideren oportuno. Sin embargo, existe un proceso de pérdida de agua independiente (transpiración cuticular) a dicha conducción, de

manera que el agua se evapora desde parte de las hojas que no se corresponden con los estomas. Esto último no es especialmente importante para especies esclerófilas, pues presentan mecanismos pasivos para su regulación (Larcher, 1977).

1.2. Antecedentes en la “selvicultura hidrológica”

Diversos autores han evidenciado la influencia del manejo o gestión del bosque en la hidrología de una cuenca, induciendo cambios importantes en los términos “interceptación” y “evapotranspiración” y con ello en la cantidad de agua disponible para uso humano (Zhang et al., 2001; Bosch y Hewlett, 1982). Según Brooks et al. (2003), la gestión forestal tiene una influencia clara en la aportación específica de las cuencas, de manera que ésta aumenta cuando:

- El bosque es cortado o aclarado.
- La vegetación que cubre una cuenca es transformada de especies de enraizamiento profundo a otras de enraizamiento más superficial.
- La cubierta vegetal es transformada sustituyendo especies con altas capacidades de interceptación por otras con menores tasas.
- Especies con tasas anuales de transpiración bajas son favorecidas frente a aquellas con altas tasas.

La selvicultura hidrológica puede definirse como una herramienta que modifica la estructura de la vegetación de acuerdo a criterios hidrológicos compatibles con una selvicultura adaptativa (del Campo et al., 2010, en revisión). En esta línea, se presentan trabajos que han estudiado el efecto que tiene la intervención selvícola (eliminación de biomasa forestal) sobre los componentes del ciclo hidrológico.

En lo que se refiere a la interceptación, varios han sido los autores que han analizado el impacto de la eliminación de biomasa forestal. Cuando se analizan sus resultados, lo primero que destaca es que el efecto no es constante en el tiempo, sino que cambia a medida que nos alejamos de la aplicación de los tratamientos. Así, en todos los estudios consultados se aprecia que como mínimo existe una reducción de la interceptación de la lluvia dos años después de la eliminación y por tanto un aumento de la precipitación efectiva o que alcanza el suelo forestal (Breda et al., 1995; Crockford y Richardson, 1990; Asdak et al., 1988; Aussenac et al., 1982; Veración y López, 1976). En estos casos, se han observado amplios rangos en el descenso de la interceptación, desde valores relativamente bajos (6 %) a otros altos (25 %), dependiendo de la especie, el % de masa eliminada y las condiciones ambientales de la zona

de estudio (Aboal et al., 2001). En otros casos, se ha evidenciado que una vez que la vegetación recoloniza el suelo, la interceptación vuelve a sus porcentajes originales (Breda et al., 1995). Estos resultados ponen de manifiesto la importancia que tiene el tiempo transcurrido desde la aplicación de los tratamientos. Según Crockford y Richardson (1990), la interceptación se verá modificada de acuerdo a la persistencia del cambio en la estructura forestal. Aussenac y Granier (1988), por su parte, estudiaron el proceso durante un periodo largo, observando que el descenso en la interceptación fue menor a medida que transcurría el tiempo, siendo nulo a partir de los cuatro años después de la intervención.

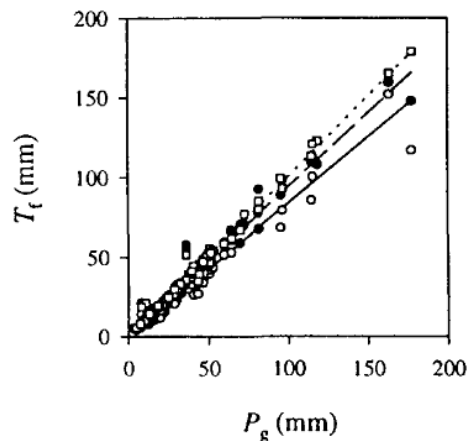


Figura 3. Relación entre la trascolación y la precipitación según una zona con tratamiento (círculos vacíos) y sin la aplicación de éste (círculos rellenos). Obsérvese como la relación trascolación versus precipitación se ha visto modificada con la aplicación del clareo

En relación a la transpiración, la hipótesis general encontrada en los trabajos consultados es que la eliminación de la cobertura trae consigo un aumento de la transpiración a nivel de individuo (Figura 4; tomada de Medhurst et al., 2002) pero un descenso cuando se considera la masa completa (Lagrergen et al., 2008; Laurent et al., 2003; Bréda et al., 2001; Morikawa et al., 1986) debido a la reducción en el número de árboles producida con la intervención. En general, suele existir una relación lineal clara entre la transpiración de la masa y la biomasa presente (Bréda et al., 2001; Morikawa et al., 1986). Según la literatura consultada, la transpiración de una masa suele reducirse con la intervención en un rango que va desde un 10 % a un 30 %, aunque depende del tipo de vegetación, del % de masa eliminado y de las condiciones ambientales.

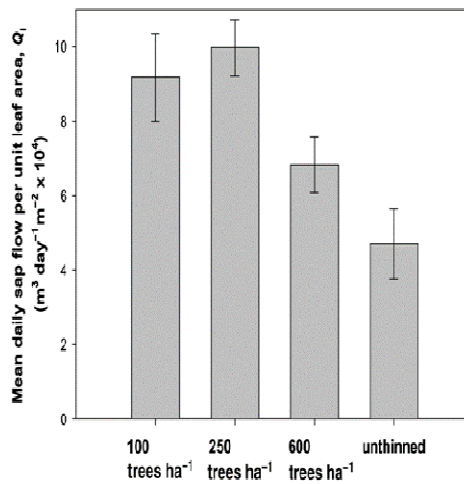


Figura 4. Transpiración media de los árboles según intensidad de clara (de Medhurst et al., 2002).

1.3. Contextualización del trabajo

A mediados de la primavera del año 2008 comenzaron los trabajos en la zona experimental, con resultados obtenidos en relación a la trascolación de la lluvia por parte de las diferentes estructuras forestales (Molina, 2008). Un año después, se incorporaron medidas adicionales relacionadas con la caracterización de la cubierta forestal, la partición de la lluvia, el contenido de humedad del suelo y la transpiración (Alarcón, 2010; Franco, 2009).

Tal y como se desprende del párrafo anterior, no todas las mediciones hidrológicas comenzaron en el mismo momento, con mayores o menores series de datos según se considere una variable u otra. Para este estudio se ha seleccionado un lapso temporal en el que se llevaron a cabo simultáneamente todas las mediciones, de manera que representa una primera aproximación al estudio conjunto de todas las variables. En la tesis doctoral se estudiará el lapso temporal completo para cada una de ellas y por tanto se presentarán análisis más amplios y concluyentes que los que aquí se exponen.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio de estudio

El emplazamiento del estudio, de coordenadas 1° 12' 30" Longitud W 39° 05' 30" Latitud N, se encuentra dentro la provincia de Valencia, concretamente en la comarca del Valle de Ayora-Cofrentes (Figura 5). De todos los municipios pertenecientes a la comarca, el monte seleccionado se halla en el municipio de Ayora, de nombre "La Hunde y La Palomera". Es un monte de utilidad pública (propiedad de la Generalitat Valenciana, número V1007V154) y tiene una extensión de unas 4500 ha.

El acceso al monte es a través de la carretera comarcal CV-440, que une las poblaciones de Ayora y Carcelén. Desde dicha carretera se toma una pista forestal en buen estado con dirección a "Casas de la Hunde". Una vez en las cercanías de "Casas de la Hunde", se encuentra un vivero perteneciente a la Generalitat Valenciana. En las periferias del vivero se encuentra la zona seleccionada para este estudio, la cual se corresponde con una repoblación de *Pinus Halepensis Mill.* llevada a cabo entre los años 1940 y 1950. Ésta se ubica en bancales agrícolas abandonados, con pendientes inferiores al 5 %, lo que hace que puedan despreciarse procesos de escorrentía.

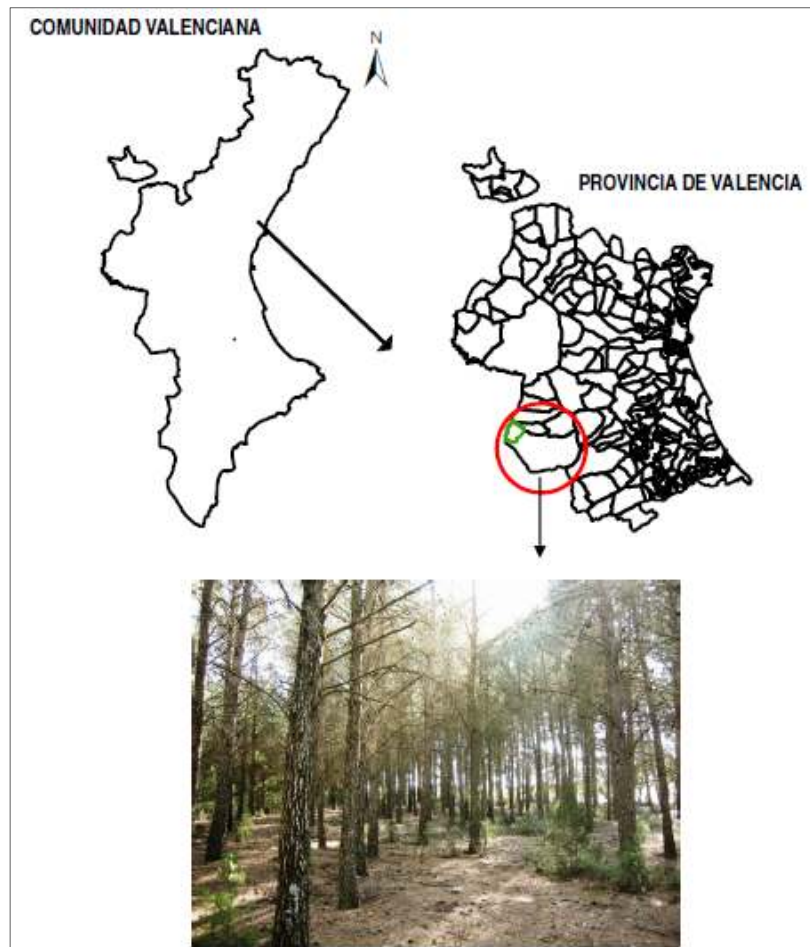


Figura 5. Localización del sitio de estudio

Clima

Se ha tenido acceso a los datos del Instituto Nacional de Meteorología para la estación meteorológica situada a pocos metros de la zona de experimentación, denominada “Ayora la Hunde”. Dicha estación es de tipo termopluviométrico, se encuentra a 960 msnm y sus coordenadas UTM son 654325 (x) y 4327612 (y). La serie de datos se corresponde con el lapso que va desde 1960 hasta 1992 para la temperatura y desde 1960 hasta 1990 para el caso de la precipitación.

En la Figura 6 se muestran los valores de temperatura media (T_m_M), media de las máximas ($T_m_Máx$) y media de las mínimas ($T_m_Mín$) para cada año, calculados con los datos medios mensuales, media de los máximos mensuales y media de los mínimos mensuales, respectivamente.

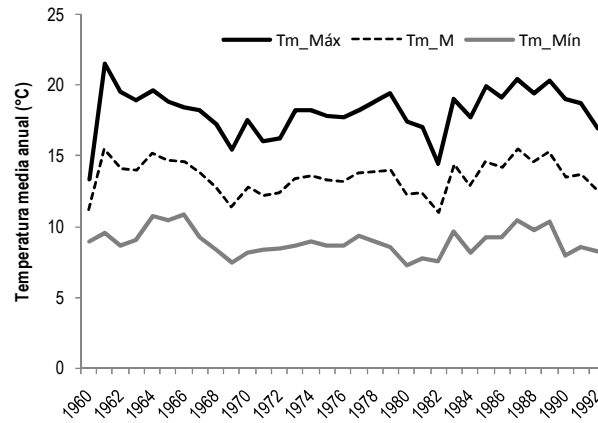


Figura 6. Temperaturas máximas, medias y mínimas anuales (1960-1992)

En lo que se refiere a las precipitaciones, se presenta por un lado la precipitación acumulada para año natural (enero-diciembre) y por otro para año hidrológico (octubre- septiembre). Se adjuntan también los valores medios: 494 mm para año natural y 492 mm para año hidrológico (Figura 7).

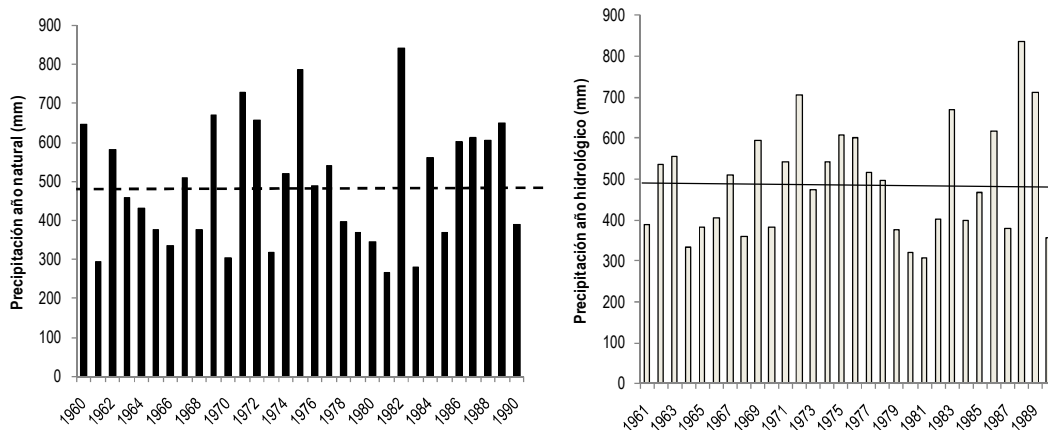


Figura 7. Precipitación anual (1960-1990) según año natural (izquierda) y año hidrológico (derecha)

El reparto mensual medio de las precipitaciones para el periodo histórico se presenta en la Figura 8, donde se aprecia que los máximos se corresponden con los meses de otoño, seguidos de los correspondientes a la primavera; los mínimos se concentran en los meses de verano. Dicho reparto estacional de la precipitación se corresponde con un clima mediterráneo con caracteres de continentalidad y tres meses de sequía (FAO, 2005). Según Cervelló Royo (2008), este monte posee unos índices de precipitación superiores a los de las zonas circundantes, a pesar de que su exposición predominante sea sur y este. El ombroclima al que pertenece es de tipo seco (350-600mm anuales).

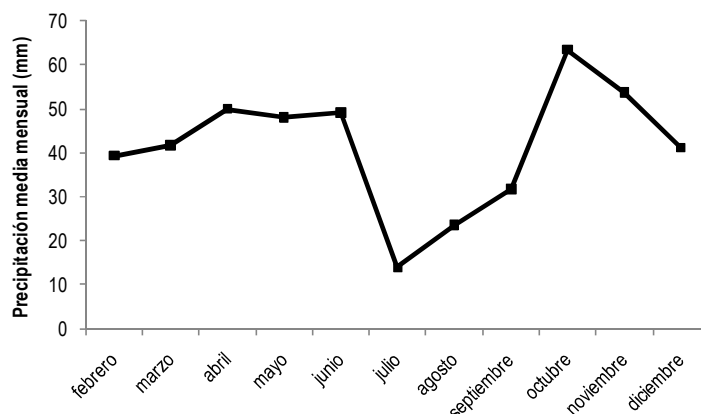


Figura 8. Precipitación media mensual (1960-1990)

Geología y edafología

En la provincia de Valencia se distinguen 2 sistemas montañosos, el Sistema Ibérico Suroriental que ocupa la mayor parte de la superficie y el Sistema Prebético Externo que se localiza al sur de la misma. Dentro del sistema Ibérico Suroriental se distinguen 3 sectores (septentrional, meridional y una zona de transición), encontrándose la zona de estudio en el sector meridional.

El sector meridional se caracteriza por la presencia de afloramientos mesozoicos, terciarios y cuaternarios. El periodo mesozoico está representado sobre todo por el Cretácico superior, generalmente dolomítico, aunque también se presentan otros materiales como areniscas calcáreas amarillentas, calizas y margas. El Terciario existente está constituido por un Neógeno reciente, principalmente detrítico.

La estructura geológica de la zona está definida por una serie de fosas tectónicas (largas depresiones limitadas en ambos lados por fallas entre las cuales el terreno se ha hundido por efecto de fuerzas internas) que delimitan dos muelas, la Muela de Carcelén, sobre la que se halla el monte, y la Muela de la Caballa, situada más al norte. Configuran una morfología en relieve invertido.

En lo que se refiere a la edafología, a partir del mapa de suelos para la Comunidad Valenciana para la hoja Ayora (768), se pueden diferenciar asociaciones de distintas unidades de suelos según la clasificación de la FAO-UNESCO 1988. La Hunde y la Palomera presenta un fluvisol calcárico que se corresponde generalmente con suelos profundos con texturas variables, incluso dentro del perfil. Los contenidos en materia orgánica son relativamente bajos, aproximadamente del 2% y disminuyen irregularmente con la

profundidad. El pH oscila entre 7,5 y 8,1 dependiendo del contenido en carbonatos, que es muy variable y normalmente se encuentra entre el 15% y el 60%.

Según muestreos realizados en suelo cercano a la zona de estudio (del Campo et al., 2008), se define éste (para la clasificación de la USDA) como franco arcillo arenoso, de una textura equilibra con contenidos de un 54,84% de arena, un 22,05% de limo y un 23,12% de arcilla.

Hidrografía e hidrología

La zona de estudio se enmarca dentro de la Cuenca Hidrográfica del Júcar. Los valores de lluvia que se registran en esta cuenca (superficie de 42.988,6 km²) generan una aportación media anual del orden de 3.200 hm³, constituyendo el fenómeno de la evapotranspiración pérdidas que rondan el 85 % del total de precipitación registrada (MMA, aplicación Directiva Marco del Agua a cuenca piloto). El río de mayor importancia de la comarca en cuanto a caudal es el Reconque, que nace al sur de la localidad de Ayora. Es un afluente del Júcar y se nutre de un gran número de cauces y barrancos aguas arriba. La mayor parte de éstos son discontinuos o efímeros y no llevan caudales en la etapa estival.

Vegetación

Para el estudio de la vegetación potencial de la zona, se han consultado las series de regresión de Ceballos (1938), así como el mapa de series de vegetación de Salvador Rivas Martínez (1987). Según el primer autor, el monte de “La Hunde y Palomeras” se encuentra inmerso en la serie de regresión número 10 de la encina, sobre terreno calcáreo. Según Rivas Martínez, la zona se corresponde con la etapa madura o clímax de un bosque denso de encinas (series mesomediterráneas de Carrasca, *Quercus rotundifolia*), que en ocasiones puede albergar otras especies y que posee sotobosque arbustivo en general no muy denso.

Con respecto a la vegetación actual, ésta coincide en lugares muy concretos con la vegetación propuesta por Ceballos o Rivas Martínez, concretamente en las partes más altas del monte, donde la encina comparte hábitat con especies adaptadas a estas condiciones; destacan la coronilla de fraile (*Globularia repens subsp. borjae*), la zamarrilla de roca (*Teucrium thymifolium*), la campanilla de roca (*Campanula viciosi*) o una especie de boca de dragón descubierta por Cavanilles (*Linaria cavanillesii*).

Según el Mapa forestal de España a escala 1:200.000 (1990), en el monte de la Hunde y Palomeras se encuentran las siguientes unidades de vegetación (Tabla 3):

Tabla 3. Vegetación actual

Unidades de Vegetación	Superficie (ha)
1) Repoblación forestal de <i>Pinus halepensis</i> con matorral de <i>Rosmarinus officinalis</i> y tomillar mixto. Cobertura del 95%.	719,07
2) Repoblación forestal de <i>Pinus halepensis</i> con matorral de <i>Rosmarinus officinalis</i> y <i>Brachypodium retusum</i> . Cobertura del 70%.	385,15
3) Matorral de degradación del pinar con <i>Rosmarinus officinalis</i> y tomillar mixto	46,34
4) Masa aclarada de <i>Pinus pinaster</i> , <i>Quercus coccifera</i> , matorral con <i>Rosmarinus officinalis</i> y tomillar mixto. Inclusión de crestones rocosos.	410,02
5) Masa mezclada de <i>Pinus halepensis</i> y <i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i> arbustivo. Cobertura del 70%.	374,54
6) Masa mezclada con 30% de cubierta de <i>Pinus halepensis</i> , 20% rodales de repoblación de <i>Pinus halepensis</i> y 10% de <i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i> . Pies de <i>Populus nigra</i> en vaguadas húmedas.	1.043,34
7) Mosaico de de <i>Pinus halepensis</i> , <i>Quercus coccifera</i> , <i>Juniperus oxycedrus</i> y <i>Rosmarinus officinalis</i> . Pies de <i>Pinus pinea</i> .	1.322,94
8) Matorral degradado. Tomillar mixto	165,47
9) Matorral denso <i>Quercus ilex</i> subsp. <i>Ballota</i> , <i>Ulex parviflorus</i> y tomillar mixto.	145,7
10) Masa forestal de <i>Pinus halepensis</i> , <i>Juniperus phoenicea</i> y <i>Quercus ilex</i> subsp. <i>ballota</i> .	23,9
11) Cultivos agrícolas.	29,66

La vegetación que se encuentra en la zona de experimentación se corresponde con la primera unidad de vegetación descrita por Ruiz de la Torre, tratándose de una repoblación monoespecífica de *Pinus halepensis* Mill. con una superficie próxima a las 720 ha. Además

de las mencionadas especies de romero y tomillo, el sotobosque también presenta regenerados de encina (*Quercus ilex subsp. rotundifolia*), numerosos individuos de coscoja (*Quercus coccifera*) y enebros (*Juniperus oxycedrus*).

2.2. Diseño del experimento, aplicación de los tratamientos y caracterización de la masa residual

Para el estudio de la intensidad de clara un año después de su aplicación (escala masa), se definieron tres tratamientos de acuerdo a la intensidad de corta más un control sin tratar (fuerte, moderada, baja y control). En primer lugar, se seleccionaron las masas donde se iba a llevar a cabo la intervención, con el criterio de tener tratamientos “control” con coberturas densas, cercanas al 100 %. Después de ello, se llevaron a cabo las cortas con el fin de obtener las coberturas aproximadas siguientes: 10 %,30 %,60 % (fuerte, moderada, baja). En resumen, se tienen por tanto cuatro tratamientos: fuerte, moderada, baja y control.

Como diseño estadístico se tomó el de bloques completos al azar, con tres bloques o repeticiones (1,2 y 3) para cada tratamiento (Figura 9). Cada bloque quedaba por tanto constituido por cuatro unidades experimentales, las cuales eran cuadradas de 30 m de lado. Recuérdese que la pendiente en todos los casos es inferior al 5 %, de manera que pueden asumirse despreciables los procesos de escorrentía.

Con respecto al estudio de la variación de los componentes del ciclo hidrológico entre la aplicación de los tratamientos y la reconfiguración de la copa del árbol (escala árbol), se llevaron a cabo mediciones en el tratamiento “fuerte” del bloque 1 y en una unidad experimental cuadrada de 30 m de lado ubicada en un cortafuegos cercano (procedente de la misma repoblación) pero realizado 10 años antes (Figura 9). Generalmente, los cortafuegos son estructuras forestales muy aclaradas, con grandes distancias (sin tangencia de copas) entre pies para evitar la propagación en caso de incendio. El criterio de corta en el tratamiento fuerte ha hecho que los pies se encuentran muy alejados los unos de los otros (sin tangencia de copas). Esto hace que pueda asumirse al cortafuegos como una evolución de las copas de los árboles en las estructuras más aclaradas.

De ahora en adelante, se usará la nomenclatura que se especifica a continuación para referirnos a los diferentes tratamientos: **Fuerte: 10, moderada: 30, baja: 60, control: 100, y cortafuegos: CF.**



Figura 9. Vista aérea (MMARM, 2009) de los bloques (1, 2 y 3) o repeticiones y del tratamiento cortafuegos (CF)

Previamente a la aplicación de los tratamientos, se caracterizó el valor de la Fracción de Cobertura Cubierta (FCC) o cobertura de la masa de la zona sin tratar, obteniéndose un valor promedio ligeramente superior al 83 % (pese a ello se seguirá con la nomenclatura propuesta de "100"). Después, en Marzo de 2008, se aplicaron los claros a diferentes intensidades con objeto de hallar las coberturas concretas para cada unidad experimental. El criterio de corta fue en todo momento el de favorecer los mejores individuos dentro de cada unidad experimental, así como una distribución de la cobertura vegetal en el espacio lo más homogénea posible.

Un año después de la aplicación de los tratamientos (Febrero 2009), se llevaron a cabo inventarios para obtener una serie de variables que caracterizasen la masa residual tras los tratamientos (Tabla 4) y variables para la caracterización a escala de árbol (Tabla 5).

Variables para la masa residual

La FCC se midió con la escuadra óptica. Este aparato permite visualizar la vertical exacta desde cualquier punto del terreno (2 niveles alojados en su interior), actuando a modo de mira. Si en la visual realizada la mira intercepta cualquier parte aérea de la vegetación, la medida tomará el valor 1, y en caso contrario, es decir cielo, tomará el de 0. En cada unidad experimental se realizó un muestreo por puntos, con un total de 50 puntos repartidos en 5 transectos lineales separados 6,5 m entre sí. Para evitar el efecto borde, se tomaron márgenes a ambos lados de 2 m. cada uno. Los diámetros así como el área basimétrica se obtuvieron mediante forcípula a 1,30 m de altura y en dos direcciones perpendiculares. La densidad de pies se obtuvo mediante conteo directo.

Tabla 4. Caracterización selvícola de los tratamientos. N es la densidad de pies, D es el diámetro a la altura del pecho, G es el área basimétrica, FCC es la Fracción de Cobertura Cubierta y LAI es el Índice de Área Foliar. Las mediciones del CF se corresponden con la unidad experimental, por lo que no se presentan estadísticos descriptivos. La unidad 30 del bloque 1 tuvo que ser descartada del estudio porque rachas de fuerte viento provocaron la caída de un gran número de pies.

Tratamiento	Bloque	N (pies·ha ⁻¹)	D (cm)	G (m ² ·ha ⁻¹)	FCC (%)	LAI (m ² ·m ⁻²)
10	1	178,0	26,8	9,4	22,0	0,5
	2	211,0	20,9	7,5	14,0	0,4
	3	144,0	22,4	8,0	12,0	0,6
		177,6 ± 33,5	23,4 ± 3,1	8,3 ± 0,9	16,0 ± 5,3	0,5 ± 0,1
30	2	478,0	21,7	18,2	50,0	1,7
	3	478,0	24,7	23,5	42,0	1,2
		478 ± 0	23,2 ± 2,1	20,89 ± 3,8	46 ± 5,6	1,4 ± 0,3
60	1	744,0	21,2	27,2	68,0	1,7
	2	722,0	17,2	27,2	56,0	2,0
	3	600,0	22,4	24,4	68,0	2,0
		688,8 ± 77,57	20,2 ± 2,7	26,3 ± 1,6	64 ± 6,9	1,9 ± 0,1
100	1	1489,0	17,8	40,1	84,0	2,6
	2	1178,0	17,2	30,1	84,0	2,8
	3	1200,0	18,8	36,5	82,0	2,6
		1289 ± 173,5	17,9 ± 0,7	35,6 ± 5,0	83,3 ± 1,1	2,6 ± 0,1
CF		155,5	33,4	13,6	28	0,9

Con respecto al índice de área foliar, se utilizó un Licor LAI-2000 (Li-Cor, 1991). Este aparato se basa en la atenuación que sufre la radiación solar a su paso por la cubierta vegetal, siguiendo la ley de Lambert-Beer, adaptada para un follaje más o menos denso (Monsi y Saeki; en Larcher, 1977):

$$I = I_0 e^{-K LAI}$$

Donde I es la radiación en el interior de la masa; I₀ es la radiación solar en el exterior sin influencia de la vegetación; K es una constante que depende de la comunidad vegetal y LAI es el índice de área foliar

Según esta ecuación, se necesitan por tanto mediciones de radiación tanto fuera (I₀) como dentro de la masa (I). Tras varias pruebas con las condiciones óptimas de iluminación (radiación difusa) especificadas en el manual (Li-Cor, 1991) y en bibliografía especializada (Welles y Cohen, 1996), se llegó a la conclusión de que dichas condiciones atmosféricas estaban lejos de ser alcanzadas en nuestro estudio, ya que la predicción de cielos

encapotados y su constancia durante la toma de medidas suponía un hándicap (para una descripción más detallada de las especificaciones técnicas del aparato, consúltese Franco, 2009). Con todo esto, se optó por realizar las medidas en condiciones de radiación directa, con las especificaciones descritas en Leblanc y Chen (2001) y la asunción de no necesidad de factores correctores para las estimaciones realizadas por el aparato (López- Serrano et al., 2001) (Molina y Del Campo, 2010; en revisión). Tras la toma de mediciones, los datos eran tratados mediante el software que acompaña al equipo (C-2000, Li-Cor, 1991).

Variables a escala árbol

Las mediciones a escala árbol se llevaron a cabo con las metodologías típicas de inventario empleadas para tal efecto. Las alturas y longitudes se estimaron con hipsómetro (Suunto, Finland). Los diámetros del tronco mediante forcípula a 1,30 m de altura y en dos direcciones perpendiculares. Para el área proyectada de copa, se midió con cinta la proyección de dos diámetros de copa representativos, de manera que el área se estimó teniendo en cuenta el promedio de ambos. Para el caso del volumen, se asumió que la copa de los pinos seleccionados se asemejaba a un volumen de dos partes, con un tercio correspondiente a una pirámide y los dos restantes a un cilindro. Además de estas mediciones, también se estimó un índice de competencia para cada árbol como la suma del área basimétrica de los árboles vecinos dentro de un radio de 3 m con respecto a su tronco. Los resultados medios junto con la desviación estándar para cada tratamiento están presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Variables del árbol medio (entre paréntesis desviación estándar) de los tratamientos. Obsérvese que los árboles de los tratamientos 10 y CF tienen índices de competencia nulos.

Trat.	Diámetro (cm)	Altura (m)	Longitud copa (m)	Área copa (m ²)	Volumen copa (m ³)	nº ramas muertas	Índice de competencia (m ² m ⁻²)
10	24,1 (2,5)	12,4 (0,4)	6,2 (1,3)	15,6 (2,6)	53,4 (13,3)	6,5 (4,1)	0
30	23,2 (5,2)	10 (0,3)	5,3 (1,2)	9,9 (1,6)	33,7 (4,9)	12,2 (6,6)	19,5
60	23,5 (5,5)	12,1 (0,5)	5,7 (1)	12,1 (6,6)	30,2 (25,3)	10,5 (2,4)	34,9
100	23,2 (5,1)	10,6 (0,8)	4,4 (0,9)	8 (3,9)	20,4 (12,2)	20 (2,4)	42,1
CF	32,3 (6,1)	11,6 (0,9)	6,8 (0,6)	25,9 (12,8)	93,9 (39,9)	2,2 (1,2)	0

2.3. Componentes del ciclo hidrológico

Las mediciones o estimaciones que se describen en estos apartados se llevaron a cabo para estudiar los procesos hidrológicos a escala masa o árbol. Sin embargo, en algunas de ellas la metodología empleada no fue la misma, de manera que en esos casos se especificarán ambas.

El intervalo de tiempo seleccionado para este trabajo va desde el 1 de junio de 2009 hasta el 31 de diciembre de 2009. Sin embargo, los resultados de transpiración relacionados con el tratamiento 30 no van a presentarse ya que su medición comenzó en una etapa posterior.

2.3.A. Cómputo de la precipitación exterior y variables meteorológicas complementarias (humedad y temperatura ambiente)

Para la medición de la precipitación exterior o incidente se instaló un pluviógrafo estándar de resolución 0,2 mm (Davis, USA), a unos 50 m de la zona de estudio y sin la influencia de ningún objeto a su alrededor. Se programó para realizar una medición por minuto, las cuales se almacenaban en un datalogger interno (Hobo, Onset application, USA). Gracias a las mediciones minutales del pluviógrafo, es posible conocer en detalle las características de las lluvias acaecidas durante el periodo de estudio (intensidad, duración, volumen...). A su vez, dichas mediciones también se pueden utilizar para definir un evento, que en el ámbito de la hidrología forestal es considerado como una lluvia separada de otras un lapso temporal suficiente para que la cubierta vegetal se encuentre totalmente seca (Gash, 1979). En gran

parte de los estudios consultados sobre el tema, se considera un lapso temporal constante para que la cubierta vegetal seque, de manera que transcurrido ese tiempo la cubierta recibirá una nueva lluvia con toda su capacidad de saturación (S) disponible para “acumular” agua. En nuestro caso, con objeto de definir un evento, se procedió de la manera que se especifica. Primero, se seleccionaron lluvias (P_g) que saturasen cualquier estructura forestal considerada y con evaporación despreciable mientras se están produciendo, esto es, lluvias copiosas, con alta intensidad y producidas durante la noche (Huber y Oyarzún, 1984). Con estas lluvias, se estudio qué cantidad trascolaba (T_c) en los pluviógrafos del tratamiento 100 (ya que éste es el que debe tener la capacidad de saturación mayor), para luego poder calcular la capacidad de saturación de la forma $S = P_g - T_c$. La capacidad de saturación estimada resultó en un valor de $3,4 \pm 0,2$ mm (asumida igual para todos los tratamientos). Una vez obtenida S, se consideró despreciable la evaporación durante las lluvias, de manera que: a) la estructura forestal acumulaba la capacidad de saturación si el chubasco era mayor a ésta, o b) la cantidad del chubasco si éste era menor que la capacidad de saturación. Por último, con la estimación de los ratios de evaporación entre los chubascos, fue posible conocer si esa cantidad acumulada tras la lluvia (S ó P) se perdía a la atmósfera o por el contrario quedaba retenida. Con esto último ya se pudieron definir los eventos.

Para la medición de la humedad y la temperatura ambiente se instalaron en el centro de cada unidad experimental y a una altura de 1 m (bloques 1 y 2), sensores capaces de medir estas dos variables simultáneamente (RH/temperature sensors, Decagon Devices, USA, 2002). Se programaron para obtener una medida cada veinte minutos. Los datos se almacenaban en un datalogger EM50 con cinco canales de conexión (Decagon Devices, USA, 2002).

La humedad y la temperatura ambiente suelen medirse en las cercanías del vuelo forestal, ya que son algunos de los factores reguladores de los fenómenos que conforman la evapotranspiración (Larcher, 1977). En nuestro caso, con objeto de obtener un valor diario que integrase estas 2 mediciones (y poder así estudiar su influencia en la transpiración diaria), se calculó un valor para el déficit de presión de vapor (DPV) diario en función de ellas. Se asumió que los datos de humedad y temperatura ambiente del tratamiento 10 se asimilaban a las condiciones que podían encontrarse en las capas de aire cercanas al dosel. De esta manera, se estima un valor para el déficit de presión de vapor como se describe a continuación (Raudkive, 1979, en Chow et al., 1994):

$$e_{sat} (kpa) = 0,611 * e^{\frac{17,27 Tm}{273,3+Tm}}$$

$$e (kpa) = e_{sat} * Hm$$

$$DPV (kpa) = e_{sat} - e$$

Donde e_{sat} es la presión en saturación, e es la presión actual, DPV es el déficit de presión de vapor, Tm es la temperatura media diaria (°C) y Hm es la humedad media diaria (como proporción).

2.3.B. Trascolución, escorrentía cortical e interceptación

Escala masa

La interceptación de la lluvia por parte de la cubierta vegetal puede calcularse por métodos directos o indirectos (Crockford y Richardson, 2000). En nuestro caso, se ha optado por la medición indirecta, estimándose previamente la trascolución y la escorrentía cortical para luego obtener la interceptación (sustrayendo la suma de trascolución y escorrentía cortical, esto es, la “precipitación efectiva” a la precipitación).

Trascolución

En la mayor parte de estudios consultados sobre la partición de la lluvia por superficies forestales, el componente trascolución es sin lugar a dudas al que mayor atención se le ha prestado, asumiéndose en la mayor parte de los casos valores para la escorrentía cortical despreciables frente a los de éste (Llorens y Domingo, 2007). La interceptación, por tanto, se ha venido calculando teniendo en cuenta sólo el agua trascolada que llega al suelo. Es importante tener en cuenta que para un buen análisis del fenómeno de la trascolución tanto la variabilidad espacial como la temporal deben estar contempladas en el diseño experimental (Lloyd y Marques, 1988). En nuestro caso, la variabilidad espacial se abordó con varias mediciones por tratamiento, repartidas en los tres bloques. Se dispusieron cuatro colectores en cada una de las unidades experimentales. Los colectores fueron construidos con canalones de PVC, generalmente usados para la recolección del agua de los tejados de las casas. Sus dimensiones son de 4 m de largo por 0,125 m de ancho, resultando un área de captación de aproximadamente 0,5 m². Es recomendable el uso de colectores de precipitación con un área mayor de 0,2 m² para obtener datos con un error inferior al 5% (Llorens y Domingo, 2007). La sección transversal de los colectores es semicircular, con una profundidad de 11 cm, lo que evitaba que las gotas de agua salpicasen al exterior. La fijación al terreno se realizó con varillas de acero de 50cm de altura. El objetivo fue elevarlo a una

altura tal que el agua salpicada desde el suelo no alcanzase su interior. Los extremos de los canalones se dispusieron a diferentes alturas para dotarlos de pendiente y facilitar con ello la evacuación del agua hacia los dispositivos de medida (Figura 10).



Figura 10. Disposición de los recolectores de trascolación

La disposición de los canalones dentro cada unidad experimental se hizo orientando cada uno de ellos en las direcciones cardinales (norte, sur, este y oeste), resultando una distribución espacial en forma de estrella. Cada canalón se situó a una distancia de 5 m desde el centro de la unidad experimental (Molina, 2008). Esta disposición pretendía obtener una zona de captación aleatoria dentro de la parcela, estando cada canalón afectado por una cobertura distinta. Con respecto a los dispositivos de medida del agua recolectada por los canalones, se utilizaron dos distintos, uno manual acumulativo y otro automático. El método manual consistió en garrafas de 25 l de capacidad, de manera que se procedía al aforo de éstas en intervalos de 1 a 2 semanas, dependiendo de las lluvias acaecidas. Con respecto al automático, 2 de las garrafas de cada tratamiento se sustituyeron por pluviógrafos (tipo EC-50, Decagon devices, USA, 2002), a resolución minutal. El objeto de la instalación de los pluviógrafos fue el de poder estudiar el proceso a escalas temporales más pequeñas que la semanal, ya que en los procesos hidrológicos suele producirse un efecto de la escala temporal (véase por ejemplo Llorens et al., 1997). A pesar de ello, en este estudio no se presentarán datos de trascolación a escalas menores que la semanal por diversos fallos durante la toma de datos de los pluviógrafos.

Escorrentía cortical o fustal

La escorrentía fustal se midió en cuatro árboles por tratamiento, seleccionados de acuerdo a la distribución diamétrica dentro del tratamiento. La literatura relacionada indica que la mejor

manera de recoger la escorrentía fustal es adhiriendo un anillo impermeable alrededor del tronco que conduzca el agua a un tubo, y éste, a su vez, la dirija a un recipiente para su almacenaje. Sin embargo, ninguna literatura consultada explica detalladamente una metodología que nosotros hayamos considerado efectiva. Según Llorens et al. (1997), la mejor metodología consiste en fabricar un anillo de espuma de poliuretano entorno al tronco a una altura de 1,30m, sellándolo a la corteza con silicona. Después de numerosas pruebas concluimos que esta tecnología estaba lejos de ser adecuada debido a diversas razones. Destacaremos que la espuma de poliuretano es muy difícil de modelar, que la silicona pierde su adherencia con la corteza del árbol al cabo de unos pocos días, que entre la corteza y el anillo existen surcos de muy difícil sellado por los que se escapa el agua y que a este sistema es muy difícil acoplarle una manguera de evacuación. Tras diversas pruebas experimentales se concluyó que la mejor solución consistía en utilizar una manguera plástica de 2,5cm de diámetro para formar el anillo que recubriera el contorno del árbol (Figura 11). Previamente a la instalación de la manguera, se eliminó la corteza del árbol para poder apoyar el plástico sobre una superficie lisa. La manguera fue adherida al árbol por medio de 4 pequeños clavos de 4cm de longitud y sellada a éste por medio de un adhesivo plástico. La manguera se colocó de forma inclinada haciendo que el agua precipite hacia un punto de desagüe, donde se dispuso otra manguera más pequeña que dirigía el flujo de agua hacia una garrafa de 6,5 litros de capacidad.



Figura 11. Disposición de los anillos de recolección de escorrentía cortical

La recogida de datos se realizó en los mismos periodos que el aforado de garrafas de trascolación, esto es, intervalos de 1 a 2 semanas.

Cabe comentar que tras un análisis detallado del funcionamiento de los captadores de escorrentía cortical durante lluvias en el mes de agosto de 2009, se observó que muchos de ellos presentaban fallos, dando lugar a errores en la recolección. Durante el mes de septiembre, se procedió a la corrección manual de todos ellos, de manera que el nuevo diseño estuvo operativo a principios de octubre. Con todo esto, los datos que se han tenido en cuenta desde junio hasta septiembre son los máximos de cada tratamiento (1 de 4), suponiendo estos valores como estimador medio. De octubre en adelante, los valores por tratamiento se obtuvieron teniendo en cuenta toda la muestra (4 árboles por tratamiento).

Para la estimación de la escorrentía cortical por tratamiento (mm), se tuvieron en cuenta las mediciones realizadas a escala árbol, de manera que se pretendía encontrar un escalar (por ejemplo, el área basimétrica) para la extrapolación de las medidas puntuales a todo el tratamiento (Hanchi y Rapp, 1997). Puesto que los resultados de las correlaciones no fueron satisfactorios (datos no mostrados), se ha asumido que la muestra representa la media, de manera que se han tenido en cuenta dos metodologías diferentes, según sea la variable utilizada. En el primer caso (Método 1), la estimación pasó por multiplicar el valor medio de escorrentía cortical (l) por la densidad arbórea (pies/m²). Para el segundo (Método 2), primero se calculó el valor medio de escorrentía cortical por m² de área de tronco a 1,30 m de altura (área basimétrica), como promedio de los árboles muestreados en cada tratamiento. Este valor se multiplicó posteriormente por la densidad de área basimétrica de cada tratamiento (mm).

Escala árbol

En este caso, la partición de la lluvia no se estimó de igual manera que para la consecución del primer objetivo. Mediciones a escala de masa hubieran significado probablemente valores muy similares de trascolación para los tratamientos comparados (10 y CF), ya que ambos poseen grandes huecos en la cubierta muy similares (véase la Tabla 4; 28 y 16 % de FCC para CF y 10 respectivamente) y como consecuencia de ello la mayor parte de precipitación irá a parar a trascolación directa (sin contacto con el dosel). Un estudio a nivel de árbol parece pues más lógico y justificado, centrándose en el componente de la trascolación que atraviesa el dosel forestal (trascolación indirecta).

La medición de la trascolación a nivel de árbol se llevo a cabo siguiendo una metodología muy similar a la que se describe en Belmonte Serrato et al. (1999). Para cada tratamiento se seleccionaron 4 árboles representativos y se dispusieron 18 colectores bajo el área

proyectada de copa de cada uno de ellos, tal y como se especifica en la Figura 12. Cada colector tenía un área de recepción circular de diámetro 18 cm y un volumen de un litro, lo que resultaba en una resolución máxima de captación de 86,6 mm. Los colectores se fijaron a varillas metálicas a 50 cm de altura para evitar la entrada de agua por rebote con el suelo (Llorens et al., 1997).

En lo que se refiere a la toma de datos, el aforado de los colectores se llevó a cabo como máximo 3 días después de una lluvia, de manera que se minimizaran las pérdidas por evaporación desde los colectores. De esta manera, y tras desechar periodos en los que se presupuso intensa evaporación o se dieron episodios de nieve, 5 fueron los datos obtenidos durante el intervalo de estudio.

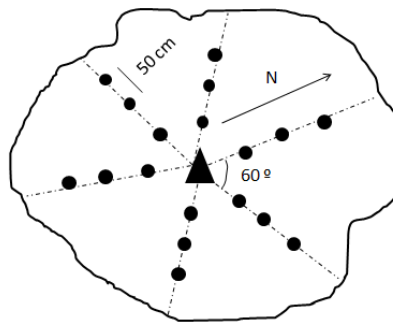


Figura 12. Representación esquemática de la distribución de los colectores debajo de la copa del árbol (círculos rellenos) en 6 ejes (18 colectores por árbol). Los ejes estaban separados cada 60°: Los colectores se dispusieron con una distancia entre sí de 50 cm.

Con respecto a la escorrentía cortical, ésta se midió de igual manera que para el estudio a escala masa. Sin embargo, en lo que se refiere a la estimación de la lámina de agua (mm), se hizo uso del área proyectada de cada árbol para tener así una medición que obedeciera a escala árbol.

2.3.C. Contenido de humedad del suelo

Para el estudio de la dinámica temporal de la humedad del suelo y de la afección de los tratamientos selvícolas, se instalaron sondas de capacitancia (Decagon devices, USA, 2002) de tres modelos diferentes: ECH₂O-EC10, ECH₂O-EC20 y ECH₂O-EC-TM.

Las mediciones para los diferentes objetivos se llevaron a cabo con la misma metodología, diferenciándose sólo en las muestras tenidas en cuenta por tratamiento y en la estimación de la lámina de agua (véanse los subapartados siguientes "Diseño experimental e instalación de

los sensores” y “estimación de la humedad del suelo de cada tratamiento, mm” para más detalles).

Teoría del método

El fundamento de las sondas de capacitancia se basa en la medición de la constante dieléctrica del medio en donde están inmersas. La constante dieléctrica del agua, con un valor de 80 (adimensional), es mucho mayor que la de los otros constituyentes del suelo (alrededor de 1), de manera que pueden despreciarse frente a los valores de ésta. Por este motivo, la constante dieléctrica es una medida indirecta de la humedad del suelo. Cada sonda lleva incorporado un condensador, el cual debe cargarse hasta un valor de voltaje (voltaje de salida) gracias a la aplicación al medio de un voltaje conocido. En función de la constante dieléctrica del medio (o dicho de otra forma la cantidad de agua), el tiempo de carga del condensador será de mayor o menor magnitud y se calcula como sigue:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{t} \left[\frac{RA}{S} \ln \left(\frac{V - Vf}{Vi - Vf} \right) \right]$$

donde k es la constante dieléctrica del medio, R es la resistencia, A es el área de las placas, S es la separación entre las placas, t es el tiempo de carga del condensador, V es el voltaje de salida, Vi es el voltaje inicial y Vf es el voltaje aplicado.

Siendo todos los valores constantes en la ecuación excepto K y t, la relación entre el tiempo de carga y la constante dieléctrica del medio es de tipo lineal. Las sondas expresan el valor de la constante dieléctrica en milivoltios de salida, de manera que con una ecuación empírica que tiene en cuenta las características del medio, se relacionan estos milivoltios de salida con una humedad volumétrica conocida, mediante una ecuación de tipo lineal (Decagon devices, USA, 2002).

Diseño experimental e instalación de los sensores

Las sondas se dispusieron a 30 cm de profundidad en dos grupos, “bajo influencia directa de árbol” y “sin influencia directa”. En total, para cada tratamiento (excepto CF) se instalaron 9 sondas, 6 “bajo influencia directa de árbol” (en 2 grupos de 3, uno para cada árbol seleccionado) y las 3 restantes “sin influencia directa”. En el caso del tratamiento CF, sólo se instalaron sondas bajo influencia directa de árbol (6: dos grupos de 3, uno para cada árbol seleccionado). La instalación en campo se realizó de forma cuidadosa con objeto de alterar lo mínimo posible la capa superior del lugar de inserción de la sonda. Se realizaban hoyos, se

insertaba una estaca de hierro acabada en punta y por último se disponía la sonda manualmente con suelo humedecido a su alrededor, favoreciendo el contacto suelo-sonda. Las sondas se programaron para registrar un dato cada 20 minutos, los cuales se almacenaban en un logger EM50 (Decagon Devices, USA, 2002).

Estimación de la humedad del suelo de cada tratamiento (mm)

Con el diseño experimental antes expuesto y asumiendo que la sonda era representativa para el perfil de suelo que va desde 0 a 30 cm, los valores de sonda en lámina de agua (mm) se obtuvieron multiplicando la humedad volumétrica (m^3 agua m^{-3} suelo) por 0,30 m (volumen explorado). Para el caso del estudio a escala masa, la humedad de cada tratamiento se estimó de acuerdo a la cobertura vegetal, asumiendo que las sondas bajo influencia de árbol (valor medio) eran representativas del área ocupada por biomasa y las otras (valor medio) de la zona sin ocupación. Para el estudio a escala árbol, solo se tuvieron en cuenta las sondas que se encontraban bajo influencia directa del árbol para los tratamientos 10 y CF, estimándose la lámina de agua (mm) como promedio de éstas.

Calibración de campo de las sondas de humedad

Valores anormales (incluso negativos) de las mediciones de las sondas hicieron que se optase por buscar una nueva ecuación a la propuesta por el fabricante que transformase los milivoltios de salida en humedad volumétrica real del suelo. Para desarrollar dicha ecuación, la mayor parte de estudios realizan una calibración de laboratorio (Cobos, 2007), ya que están centrados en terrenos agrícolas donde el laboreo del suelo hace que no hayan porcentajes elevados de elementos gruesos. Sin embargo, en nuestro caso se consideró una calibración de campo, de mejores resultados que una de laboratorio pues se tiene en cuenta el contenido de elementos gruesos del suelo (Lado, 2010; Lab-Ferrer S.L. comunicación personal, 2010*). Tal y como se describe en Lado (2010), el mejor método para estimar la humedad volumétrica en un suelo como el presentado en este estudio (forestal con un número elevado de elementos gruesos), consiste en determinar la humedad volumétrica a partir de la gravimétrica, teniendo en cuenta no la densidad aparente de la tierra fina de las muestras, sino la densidad aparente real (incluyendo los elementos gruesos). La humedad volumétrica obtenida se relaciona luego con las lecturas de las sondas, para, en los casos oportunos, modificar las ecuaciones que vienen por defecto. Para el cálculo de la densidad aparente real se hace necesario conocer los valores de la densidad de la fracción fina y los de la densidad real (elementos gruesos mayores a 2 mm). En nuestro caso, se tomaron

*Distribuidor oficial de la casa Decagon Devices

muestras pertenecientes a todos los tratamientos, de las que se extrajeron el peso y el volumen de piedras (método del picnómetro) y con ellos se obtuvo una densidad real (asumida constante a lo largo del tiempo y el espacio) de $2,48 \pm 0,03 \text{ g cm}^3$. Con este valor y el peso de los elementos gruesos, es posible calcular la densidad aparente de la tierra fina (que también se asumirá constante en el espacio y en el tiempo), que resultó en un valor de $1,15 \pm 0,14 \text{ g cm}^3$.

Con estos valores asumidos entonces constantes, es posible calcular la densidad aparente real de una muestra si se conoce la masa de elementos gruesos que contiene (Grossman y Reinsch, 2002; Vincent y Chadwick, 1994; en Lado, 2010). La densidad aparente real (ρ_{ar}) se introduce en la formulación de la manera que sigue, para obtener la humedad volumétrica de cada muestra:

$$\theta_v = w \cdot \rho_{ar} = \frac{P_h - P_s}{P_s} \cdot \left(\frac{P_s}{\frac{P_s - P_p}{\rho_{ar}} + \frac{P_p}{\rho_p}} \right)$$

Donde w es la humedad gravimétrica, P_h y P_s son el peso húmedo y seco de la muestra respectivamente, P_p es el peso de las piedras, ρ_{ar} es la densidad aparente real y ρ_p es la densidad de las piedras o elementos gruesos

A su vez, los pasos seguidos para la obtención de muestras han sido:

1. Para cada grupo de sondas (3 con influencia de árbol) o cada una individualmente (sin influencia directa de árbol), se obtuvo una muestra por medio de la apertura de un hoyo a 30 cm de profundidad cercano a éstas. Una vez extraídas, se procedía a guardarlas en bolsas herméticas para la conservación del agua y su posterior tratamiento en laboratorio.
2. Una vez obtenidas las muestras, se obtenían mediciones de las sondas de humedad, con objeto de la posterior comparación.
3. En el laboratorio se obtenía el contenido de agua por el método gravimétrico (estufa durante 48 horas a 105°C), además del peso de los elementos gruesos presentes en cada muestra (con el empleo de un tamiz de 2 mm, agua y estufa).

Estos pasos se realizaron en diferentes fechas (4 muestreos en el año 2010 de acuerdo a las lluvias y condiciones climáticas), de manera que se tuvieran dos mediciones próximas a capacidad de campo (15.04.2010 y 21.05.2010), una a saturación (14.01.2010) y otra última al punto de marchitez permanente (03.08.2010). Con dichas mediciones se procedió a obtener la ecuación de calibración $\theta_v = f(\text{milivoltios de salida})$.

2.3.D. Transpiración

Teoría del método

El método empleado para la estimación de la transpiración de los diferentes tratamientos consistió en sensores de flujo de savia (ICT International, Australia), basados en el *Heat-Ratio Method* (Burgess et al., 2001). Dentro de la gran variedad de sensores de flujo de savia basados en la propagación de un pulso de calor artificial dentro de una superficie conductora (en nuestro caso, tronco de árbol), el aquí elegido se centra en la medición de la velocidad de propagación. El método supone que la propagación de calor dentro del tronco del árbol se debe al flujo ascendente de agua por el tejido xilemático, como consecuencia de la transpiración. El calor es emitido por una resistencia (acoplada a una aguja). A la misma distancia aguas arriba y aguas abajo de la resistencia, se localizan otras dos agujas, en las que se encuentran los medidores de temperatura (termopares) a dos profundidades (dos termopares por aguja). Los termopares son los encargados de captar el aumento de la temperatura (Figura 13).

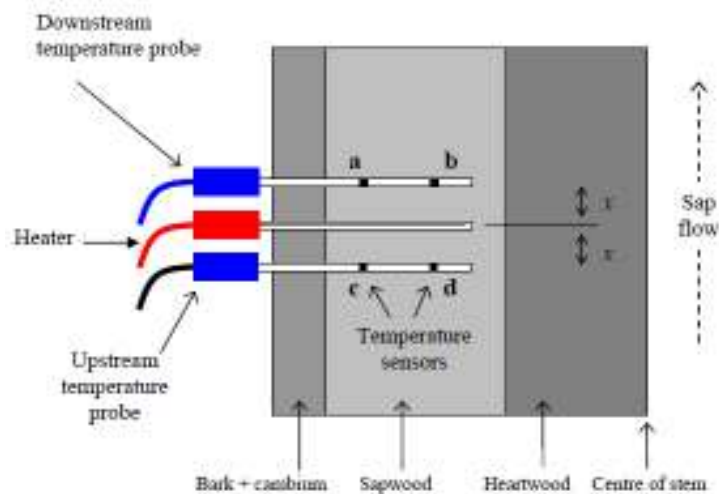


Figura 13. Esquema del funcionamiento y estructura de los sensores de flujo de savia (de Manual ICT International). Los termopares exteriores están representados por las letras a y c y los interiores por b y d.

Una vez transcurrido un tiempo inicial tras la emisión del pulso de calor (periodo de estabilización de la temperatura), los termopares captan el aumento de la temperatura, de manera que conociéndose la distancia entre éstos y la aguja emisora (0,5 cm), es posible calcular la velocidad para cada uno de ellos. Siendo v_1 la velocidad ascendente calculada en los termopares (a y b) de la aguja localizada “aguas abajo”, y v_2 la velocidad de los termopares “aguas arriba” (c y d), se estima la velocidad del pulso de calor (V_h) para cada

profundidad (externa e interna) con la ecuación que se especifica a continuación (Marshall, 1959):

$$V_h = \left(\frac{K}{x}\right) * \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) * 3600$$

donde: V_h es la velocidad del pulso de calor (cm/h); K es la difusividad térmica de la madera verde ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$); x es la distancia que separa el foco emisor de los termopares (cm); v_1 es la velocidad en la aguja situada "aguas abajo" (a favor de flujo ascendente) (cm/h); v_2 es la velocidad medida en la aguja situada "aguas arriba" (cm/h). Nótese que en el caso de que no exista transpiración (por ejemplo, en noches de invierno con temperaturas menores a 7°C), v_1 y v_2 serán iguales, de manera que la velocidad del pulso de calor resultante será nula ya que solo se deberá a la propagación del calor por conducción.

Previamente a la instalación de los sensores en los árboles seleccionados para tal efecto, cierta información tuvo que ser recogida (véase Burgess et al., 2001; Manual ICT International, Australia, para mayor detalle). En primer lugar, puesto que los datos de velocidad estimados suelen integrarse a toda la sección del tronco de madera (área de xilema) para el cálculo de flujo (Q , volumen/tiempo), era necesario conocer si los árboles que iban a muestrearse disponían de madera no conductora (duramen). Para ello, se derribaron árboles en zonas aledañas a los tratamientos, lo que permitió descartar la presencia de duramen. En segundo lugar, el empleo del método pasa por conocer ciertos parámetros necesarios para: a) el cálculo de la difusividad térmica de la especie objeto de estudio y b) la conversión de V_h en velocidad de flujo de savia, V_s (Barret et al., 1995), ya que la primera no tiene en cuenta el medio en el que se está propagando el pulso de calor (para conocer las fórmulas empleadas en estos cálculos, véase Burgess et al., 2001). Para la obtención de dichos parámetros, se extrajeron muestras de madera de siete árboles de la misma especie en zonas colindantes a los tratamientos. Las muestras se colectaron a 1,30 m de altura mediante barrena de Pressler.



Figura 14. Detalle de la instalación de los sensores de flujo de savia en campo

Una vez recolectada la información requerida previa a la instalación, el paso siguiente fue el cálculo del área de xilema de cada árbol seleccionado, con objeto de poder extrapolar las mediciones puntuales de velocidad de flujo de savia (V_s , cm h^{-1}) a flujo de savia (Q , $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$), teniendo en cuenta las mediciones en cada par de termopares (a las dos profundidades). Para ello, se realizaron mediciones directas de los diámetros y del espesor de corteza. Una vez calculada el área de xilema de cada árbol, ésta se subdividió en dos, de manera que la velocidad de flujo de savia para el par de termopares externos (en la Figura 13 representados como a y c) representará la sección que va desde el exterior del tronco hasta el punto medio entre los termopares (en la Figura 15 el área punteada), mientras que para los termopares internos la sección será el área restante (en la Figura 15 el área sin rellenar). No se considero un reparto homogéneo del área de xilema ya que el flujo no es constante en toda la sección, disminuyendo en dirección al centro del tronco (Cohen y Cohen, 2008). Con todo esto, se tiene entonces que el flujo de savia para cada árbol será la suma de los flujos de savia de las dos secciones.

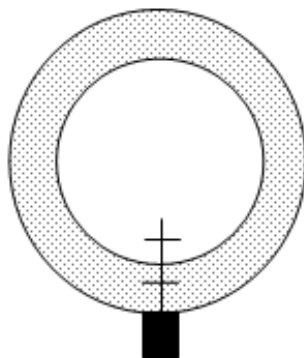


Figura 15. Representación de la sección transversal de la inserción de un sensor de flujo de savia en un tronco. Se presentan cada par de termopares con líneas horizontales. A su vez, están representadas las áreas de cada par de termopares (área punteada para los externos, área vacía para los internos).

Diseño experimental e instalación de los sensores

Partiendo del conocimiento de la distribución diamétrica de los árboles dentro de los tratamientos, se creyó oportuno considerar tres clases diamétricas artificiales (grande, media, baja), representando la clase “media” casi la totalidad de los árboles presentes en todos los tratamientos. Con esta premisa, se seleccionaron dos árboles representativos para la clase “media”, uno para “grande” y otro para “baja” (4 árboles por tratamiento).

Una vez seleccionados los árboles muestra para cada tratamiento, se procedió a la instalación de todo lo necesario para poner en funcionamiento los sensores de flujo de savia: cableado, cajas de distribución de la corriente eléctrica, alimentación (panel solar), batería, logger, etc (más detalles en Alarcón, 2010). La instalación de los sensores se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito en el manual (ICT International, Australia). Todos los sensores se posicionaron a 1,30 m de altura y en la cara norte de los troncos (Figura 14). Se asumió que no existía variación del flujo de savia dentro de los diferentes radios del tronco (Cohen y Cohen, 2008). Los sensores se programaron para recoger datos a la frecuencia temporal más pequeña posible, esto es, 10 minutos.

Estimación de la transpiración de cada tratamiento (mm)

La transpiración de una masa (T) se puede estimar de varias formas, según sea el escalar que se utilice para la extrapolación de escala árbol (flujo de savia, Q) a escala masa. En nuestro caso, puesto que disponíamos de tres clases diamétricas por tratamiento, se asumió que cada árbol seleccionado (o media de árboles, en el caso de clase diamétrica “media”) representaba su clase y por tanto su dato se correspondía con la media de su clase. Para

cada clase se calculó entonces el flujo de savia por m² de hoja, esto es, Q/A_{f_i} (flujo de savia /área foliar). Sin embargo, al no disponer nosotros de mediciones de área foliar de los árboles, se hizo uso de una ecuación para la especie en cuestión, desarrollada en una zona muy cercana a la del presente trabajo (López-Serrano et al., 2000).

$$A_{fi} = 0,0536 * D^{2,05}$$

Donde: A_{f_i} (m) es el área foliar del árbol considerado y D su diámetro a la altura del pecho (m).

Con el dato de área foliar de clase diamétrica, el número de árboles por clase según tratamiento, su proporción con respecto al total (N_i/N), el LAI de cada tratamiento (Tabla 4) y el flujo de savia medio diario para cada clase, se estimó entonces la transpiración diaria de la siguiente forma (adaptado de Merdhuust et al., 2002):

$$\left[T = \frac{LAI \text{ trat.}}{N} * \sum_{i=1}^{ni} \frac{Q_i}{LAI_i} * N_i \right] * \frac{24}{10^6}$$

Donde: T es la transpiración diaria del tratamiento (mm), LAI trat. es el LAI, N el número total de árboles, Q_i = cm³ agua día⁻¹ para cada clase diamétrica, LAI_i = m² hoja para cada clase diamétrica, n_i = número de clases diamétricas y N_i el número de árboles de cada clase diamétrica

2.4. Tratamiento y análisis estadístico de los datos

En primer lugar, todos los datos generados manualmente o con formatos diferentes a Excel se digitalizaron o convirtieron mediante Microsoft Office 2007. Una vez en el programa, se depuraron las series que presentaban errores y se generaron hojas de cálculo acordes con los análisis estadísticos a realizar. Los análisis estadísticos así como la estimación de estadísticos descriptivos se llevaron a cabo con el paquete informático SPSS 16.

Comparaciones de medias

Las comparaciones entre tratamientos se llevaron a cabo generalmente mediante análisis de varianza, ANOVA, de uno o dos factores. Las pruebas post- hoc o a posteriori tras el análisis ANOVA, se llevaron a cabo mediante el Test de Tukey.

Previamente a la aplicación de los análisis comentados y asumiendo en todos los casos datos normales, se comprobó la hipótesis de homogeneidad de varianzas. Para ello se llevó a cabo la prueba de Levene. En el caso de que no se cumpliera la homogeneidad de varianzas, los

datos eran transformados y posteriormente se analizaba la transformada. En la mayor parte de los casos, con modificaciones tipo potencia se conseguía cumplir con el postulado.

A pesar de todo, hubo algunos datos que por su naturaleza no cumplían la homogeneidad de varianzas. Para éstos, se realizó la prueba de Kruskal- Wallis basado en la distribución Chi cuadrado para la comparación de medias. En este caso, la comparación a posteriori entre pares de medias se llevo a cabo con el test de Tamhane T2, asumiendo no igualdad de varianzas.

Análisis de regresión

Con respecto a la regresión lineal, ésta nos permite evaluar si la relación entre dos variables (dependiente e independiente) sigue una función rectilínea y cómo se ajustan los datos observados a dicha relación (coeficiente R del ajuste). Para aplicarla, los requisitos que han de cumplirse son:

- Linealidad.
- Independencia de los residuos (diferencias entre los valores observados y los pronosticados).
- Normalidad de los residuos
- Igualdad de varianzas de los residuos

La linealidad se comprobó empleado el coeficiente de correlación de Pearson. Para el caso de la independencia, ésta se evaluó haciendo uso del test de Durbin-Watson. Valores del estadístico entre 1,5 y 2,5, indican independencia de los residuos del modelo. Se asumió tanto la normalidad como la igualdad de varianzas para los residuos en todos los análisis de regresión lineal realizados.

En lo que se refiere a los otros análisis de regresión utilizados, se comprobaron de igual forma los postulados excepto aquel que se relaciona con la linealidad, no necesario en este caso.

Todos los análisis se llevaron a cabo con un nivel de significación $p < 0,05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Precipitación incidente y su partición: trascolación, escorrentía cortical e interceptación

Escala masa

Del total de precipitación recibida durante el periodo de estudio, se ha tenido en cuenta una cantidad de 87, 23 mm, ya que se desestimaron los periodos donde hubo fallos en la recolección de datos o evaporación excesiva desde los recipientes colectores (Figura 16). Nótese que una gran parte de la precipitación se produjo en días sucesivos de los meses de septiembre (81,5 mm) y diciembre (145,6 mm), con grandes intensidades de lluvia que provocaron el desbordamiento de los colectores de trascolación y escorrentía cortical.

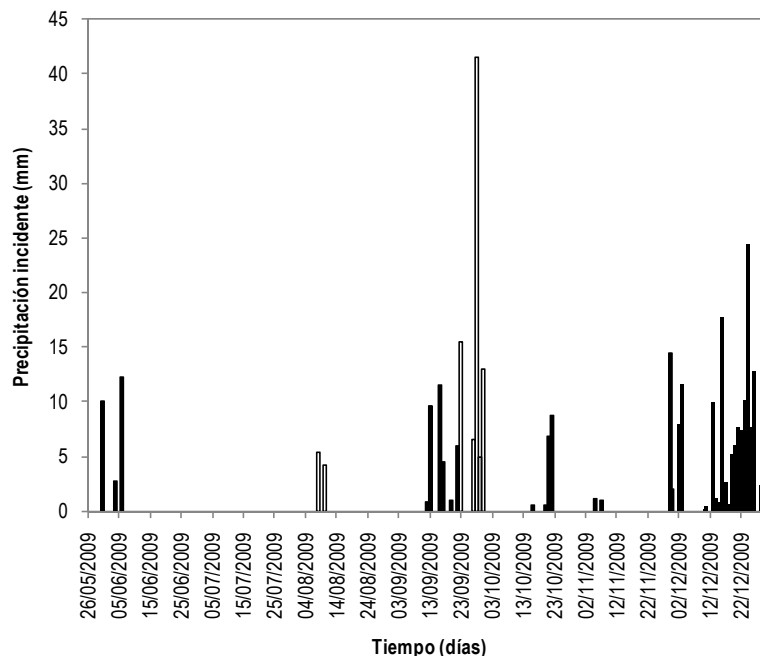


Figura 16. Precipitación diaria (mm) durante el periodo de estudio. Las barras sin colorear representan los días no estudiados, mientras que aquellas coloreadas se corresponden con días dentro de las 6 semanas en estudio.

Las marcas en el eje de abscisas están representadas cada 10 días.

En la Tabla 6 pueden observarse los periodos estudiados (semanas de la 1 a la 6), así como las características más importantes de los eventos constituyentes. Casi todos los periodos estuvieron constituidos por más de un evento, exceptuándose la semana 2, en la que toda la precipitación recogida se correspondió con un único evento.

Tabla 6. Resumen de los periodos semanales estudiados en la partición de la lluvia. N_{eventos} es el número de eventos producidos; V_{med} es el volumen medio de los eventos; $V_{\text{máx}}$ y $V_{\text{mín}}$ representan el máximo y el mínimo volumen de evento; I_{med} , $I_{\text{máx}}$ e $I_{\text{mín}}$ idéntico a los volúmenes pero referente a la intensidad; N_{oc} representa el porcentaje de lluvia recogida durante la noche (20 h-8 h).

Periodo	Semana	Pincid. (mm)	N_{eventos}	V_{med} (mm)	$V_{\text{máx}}$ (mm)	$V_{\text{mín}}$ (mm)	I_{med} (mm/h)	$I_{\text{máx}}$ (mm/h)	$I_{\text{mín}}$ (mm/h)	N_{oc} (%)
26 mayo-6 jun.	1	14,4	5	3,7	8,6	1,4	2,5	4,2	1,2	77,0
6 jun.-22 jun.	2	11	1	11,0	11,0	11,0	3,6	3,6	3,6	100,0
1 sept.-14 sept.	3	10,4	4	5,2	8,6	1,8	2,5	3,1	1,9	84,0
14 sept.-21 sept.	4	16	-	-	-	-	-	-	-	-
15 oct.-22 oct.	5	16,8	9	8,4	16,0	0,8	0,7	1,3	0,0	55,0
22 oct.- 2 dic.	6	18,6	6	6,2	16,4	1,0	0,9	1,2	0,6	45,0

Puesto que la partición de la lluvia por parte de la vegetación depende de la escala temporal considerada (Llorens et al., 1997), se ha creído conveniente partir primero de un análisis general de los datos (análisis global) para entrar luego en mayor detalle en los periodos de medición o semanas.

Análisis global

Los valores para el periodo completo para trascolación y escorrentía cortical según tratamiento se presentan en la Figura 17 y Tabla 7, respectivamente. En primer lugar cabe destacar que la mayor parte de la precipitación producida durante todo el periodo de estudio alcanza el suelo vía trascolación en el tratamiento 10, con un 82 % con respecto a la precipitación incidente (Figura 17), suponiendo la escorrentía cortical un valor de 0,14 % (Tabla 7). Las pérdidas por interceptación a la atmósfera por parte de este tratamiento pueden estimarse entonces en un 17,9 %. En el caso extremo, nos encontramos con el tratamiento control o 100, con un valor para la interceptación de 43,7 %, indicando que casi la mitad de la precipitación que alcanza el dosel en este tipo de masas sin tratar es devuelta a la atmósfera. Los valores encontrados para este tratamiento concuerdan con los reportados en la literatura científica para esta especie, de manera que en una revisión del tema sobre la partición de la lluvia en los ecosistemas mediterráneos europeos, se encontró un valor medio de interceptación que ronda el 35 % de la precipitación incidente (Llorens y Domingo, 2007).

En lo que se refiere a la comparación entre tratamientos, los análisis post-hoc confirmaron que las diferencias más notables se encuentran entre los tratamientos 10 y 100 (Figura 17) (véase anejo estadístico). Para el caso de los otros tratamientos, los análisis estadísticos post-hoc sólo resultaron significativos para la comparación de medias entre 10 y los demás, de manera que los subconjuntos homogéneos resultantes agruparon al tratamiento 10 en un

grupo y al resto en otro (Figura 15) (véase anejo estadístico). A pesar de que los tratamientos 30, 60 y 100 no resultaron diferentes estadísticamente, puede decirse que se observa un aumento gradual de la interceptación en función de la cobertura vegetal, con valores muy similares entre los tratamientos 30 y 60, pero siendo éstos menores que el del 100 o control.

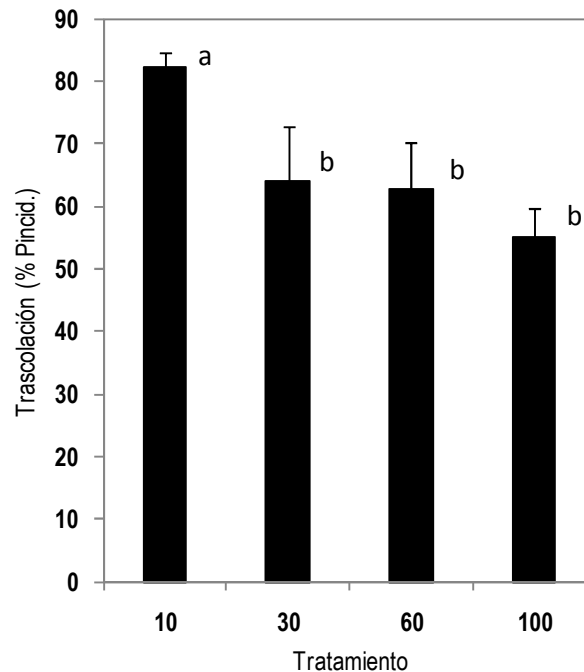


Figura 17. Trascolación media (% de la precipitación incidente) para cada tratamiento. Las barras de error representan la desviación típica. Se adjunta a su vez el resultado de las comparaciones post-hoc o a posteriori basadas en el test de Tukey a $p < 0,005$ (a ó b)

En lo que se refiere a la escorrentía cortical, el tratamiento control ha resultado ser el mayor en términos de porcentaje con respecto a la precipitación incidente, con valores entre 1,30 y 1,85 % según el método considerado (Tabla 7). El escalonamiento entre los valores por tratamiento se ha debido al número de árboles por tratamiento, de manera que un mayor número de árboles ha resultado en mayores escorrentías corticales. Sin embargo, es de resaltar que existe una diferencia notable entre el tratamiento 100 y los demás que parece no sólo explicarse por las diferencias entre la densidad de los individuos de los tratamientos (Tabla 7). Cuando se analizan los datos a nivel de árbol, se observa que los valores para el 100 han resultado muy superiores a los demás, con periodos semanales en los que se superaba incluso el 6 % o 4 % de la precipitación según un método u otro (Tabla 12, anejo de datos complementarios, semana 2). Comparaciones entre variables a escala árbol entre los tratamientos (análisis no mostrados) revelaron que sólo la variable “número de ramas muertas” fue significativamente diferente en el tratamiento 100 respecto a los demás, de

manera que podría ser una variable explicativa en este caso. Por su parte, Aboal et al. (1999) estimaron un modelo multivariante en el que las variables más importantes que afectaban a la escorrentía cortical fueron el volumen de copa de los árboles estudiados y el grado de competencia de los árboles vecinos, calculado este último de acuerdo a la cantidad de copa de los árboles vecinos que se encontraba por encima del árbol estudiado. En nuestro caso, el grado de competencia se estimó de acuerdo a los vecinos cercanos a un radio de 3 m desde el centro del árbol muestreado (la masa en estudio no se encuentra estratificada verticalmente), asumiendo que su presencia podía tener efecto en las lluvias afectadas por los vientos. Sin embargo, puesto que los árboles del tratamiento 100 han generado los mayores valores, este factor parece no haber tenido ningún efecto claro en la escorrentía cortical.

Tabla 7. Valores medios de escorrentía cortical por tratamiento (como % de la precipitación) junto con los coeficientes de variación (CV)

Trat.	Método 1		Método 2	
	% Pincid.	CV (%)	% Pincid.	CV (%)
10	0,13	137,31	0,15	136,03
30	0,35	145,00	0,37	142,44
60	0,44	160,76	0,49	166,44
100	1,85	141,76	1,30	138,76

Por último, se creyó oportuno ajustar un modelo simple empírico que permitiese calcular la interceptación en función del grado de cobertura vegetal (Figura 18). En nuestro caso, tras estudiar el grado de ajuste y significación de varias funciones así como el error estándar de la estimación, se concluyó que un ajuste potencial era el más adecuado, con la interceptación (% de la precipitación) en función del índice de área foliar (Figura 18). De la Figura 18 se extrae que la reducción de la cobertura no guarda la misma proporción que la reducción en la interceptación. Obsérvese, por ejemplo, que una reducción de la cobertura en un 50 % (en términos de índice de área foliar) ha traído consigo una reducción en la interceptación de un 15,2 %. Esta desproporción entre la biomasa eliminada y la interceptación resultante está en consonancia con los resultados obtenidos en esta materia (Aboal et al., 2000), de manera que el grado de proporcionalidad depende de las condiciones climáticas y de las lluvias producidas durante el estudio, así como del tiempo transcurrido desde la aplicación de los tratamientos (Crockford y Richardson, 1999).

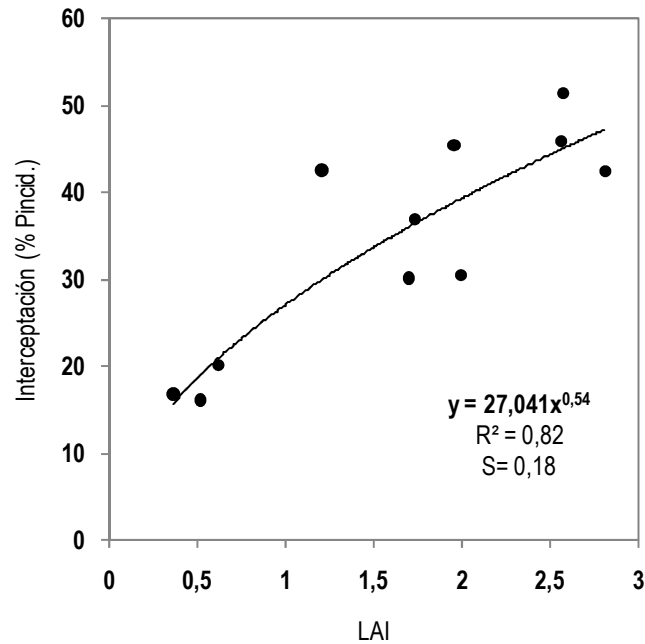


Figura 18. Modelo potencial para la interceptación global (% de Pincid.), como función del Índice de Área Foliar de los tratamientos (n = 11)

Análisis según periodos semanales

Los valores de interceptación por tratamiento según semana (mm) y el análisis estadístico de comparación entre tratamientos se presentan en la Figura 19 y Tabla 8, respectivamente (para conocer en detalle los datos de trascolación y escorrentía cortical semanal véase anejo de datos complementarios). Cabe resaltar que en todos los casos el ANOVA resultó ser significativo (exceptuándose la semana 1), con las mayores diferencias encontradas entre los tratamientos extremos, esto es, los tratamientos 10 y 100 (Tabla 8). El patrón que se encuentra en los datos es similar al observado en la escala global, con valores más o menos cercanos entre los tratamientos 30 y 60 (dependiendo de la semana, en algunas de ellas el tratamiento 60 se aproxima en mayor medida al tratamiento 100 que al 30) y con valores muy diferentes entre 10 y 100. Sin embargo, no deja de llamar la atención que en todas las semanas no se mantiene dicho patrón general, con semanas en las que, por ejemplo, el tratamiento 30 es más similar al 100 que el tratamiento 60 (Figura 19, semana 3). Esto último sugiere que el efecto de clara varía según las características de la lluvia (Crockford y Richardson, 1999) y de las variables climáticas que afectan a la evaporación del agua desde las superficies forestales (Teklehaimanot et al., 1991), de manera que en algunos casos las estructuras más aclaradas trascolan menor cantidad que otras con más biomasa por la mejor ventilación del dosel (evaporación durante la lluvia). En todo caso, tanto de la escala global

como de la semanal se desprende que una eliminación muy fuerte de biomasa (del 100 al 10: 85 % en términos de índice de área foliar) ha llevado asociados cambios sustanciales en la partición de la lluvia, los cuales se han mantenido independientemente de la escala considerada y de las características de las lluvias.

Además de las diferencias entre tratamientos, de la Figura 19 se desprenden otras consideraciones. Es conocido que precipitaciones intensas, cortas y copiosas suelen ser las que producen mayores trascolaciones y con ello, las menores (Gash 1979; Llorens, 1997; Crockford y Richardson, 2001). A su vez, procesos de reevaporación entre los eventos o durante la lluvia hacen que la capacidad de saturación del dosel se modifique (Klaasen et al., 1998), pudiendo albergar mayor o menor contenido de agua y variando con ello la interceptación. En el caso de las semanas aquí presentadas, se observa que las semanas 2 y 4 son las que menor interceptación (mayor trascolación) presentan para todos los tratamientos. Con respecto a la primera, la explicación puede ser que precisamente esta semana se caracterizó por tener tan sólo un evento, de alta intensidad ($3,6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), alto volumen (11 mm) y todo ello producido durante la noche, con lo que la capacidad de saturación del dosel se alcanzó rápidamente en todos los tratamientos y los procesos de evaporación durante la lluvia fueron despreciables por la alta intensidad de ésta y la baja demanda evaporativa (noche). En relación a la segunda semana, un error en el pluviógrafo exterior hizo que no pudieran computarse datos para caracterizar los eventos (teniendo que utilizarse datos del vivero cercano para conocer la cantidad de lluvia durante el periodo de fallo) y con ello no pudo estudiarse la influencia de la lluvia en la trascolación conjunta de los tratamientos.

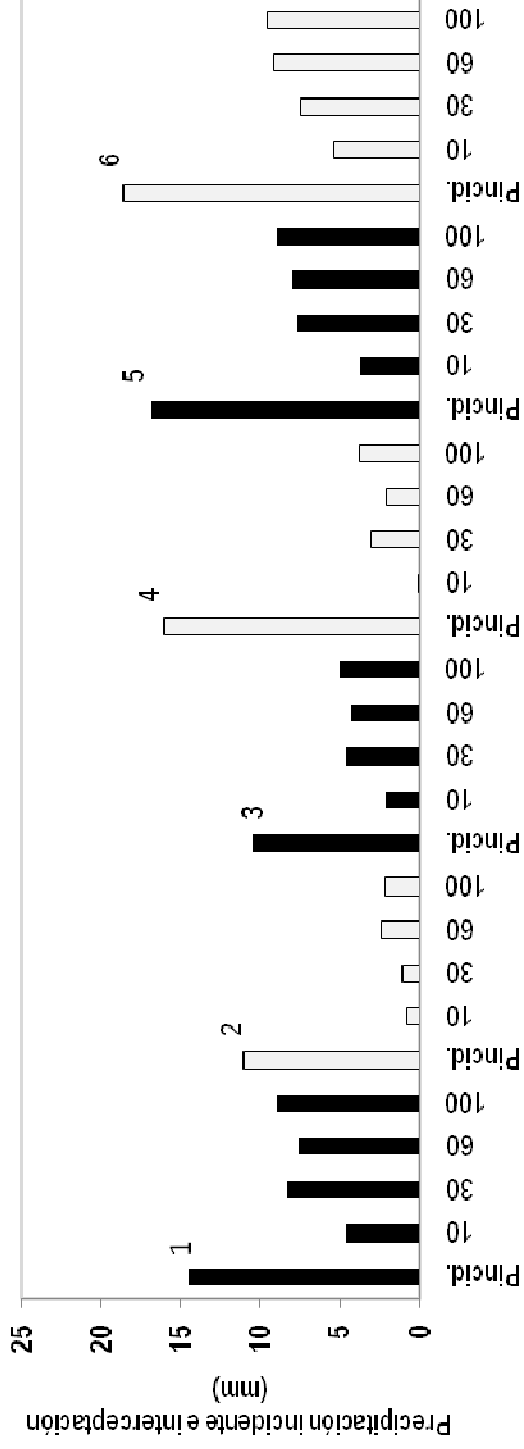


Figura 19. Interceptación semanal media (mm) de cada uno de los tratamientos, junto con la precipitación incidente. Los números representan el período semanal correspondiente (1 a 6).

Tabla 8. Resultados estadísticos de la interceptación semanal. Se presentan para cada semana las significancias estadísticas del test de Levene (Levene), del ANOVA (ANOVA), de las pruebas post-hoc (Post-hoc) y los grupos homogéneos resultantes de las pruebas post-hoc (Grupos homog.)

Semana	Levene	ANOVA	Post hoc	Grupos homog.
				10
1	0,9	0,3	0,3	30;60;100
				10
2	0,8	0,001	0,001	30;60;100
				10
3	0,3	0,001	0,001	30;60;100
				10;30
4	0,7	0,001	0,001	30;60;100
				10
5	0,9	0,001	0,001	30;60;100
				10;30
				30;60
6	0,9	0,001	0,0001	60;100

Escala árbol

La precipitación total durante los periodos estudiados a nivel de árbol asciende a un valor de 72,83 mm, repartida en 5 tomas de datos: 2,4 (Figura 20.a), 26,4 (Figura 20.b), 16,8 (Figura 20.c), 16,4 (Figura 20.d) y 10,8 (Figura 20.e) mm.

En primer lugar se presentan los resultados de la trascolación media según árbol para los tratamientos 10 y CF en los 5 periodos estudiados (Figura 20). Tras realizar las transformaciones oportunas para cumplir los postulados iniciales del análisis estadístico ANOVA (homogeneidad de varianzas), en todas las fechas estudiadas se dieron diferencias significativas entre tratamientos, además de para todo el periodo global (véase anejo estadístico). Esto último indica que la trascolación a nivel de árbol es diferente a medida que el árbol va densificando su copa tras la intervención (Figura 20.f), con una variación entre los dos tratamientos comparados de 10 % con respecto a la precipitación (Figura 20.f).

Otro aspecto destacable es el diferente grado de dispersión encontrado entre los árboles de cada tratamiento, con una desviación típica media (promedio de las 5 desviaciones típicas) para el tratamiento 10 de 0,53 mm y de 1,21 mm para el tratamiento CF. Las diferencias entre tratamientos así como dentro éstos están estrechamente ligadas a la capacidad de saturación de los árboles, aumentando la interceptación (disminuyendo la trascolación) de la lluvia a medida que ésta crece (Belmonte Serrato et al., 1997). Para el caso del tratamiento 10, las diferencias

estructurales entre los árboles eran muy pequeñas, de manera que la trascolación ha tenido una dispersión relativamente baja. En CF, por el contrario, dicha dispersión ha sido mayor ya que el crecimiento de las copas ha sido desigual (Tabla 5) y por tanto se suponen efectos diferentes en la partición de la lluvia.

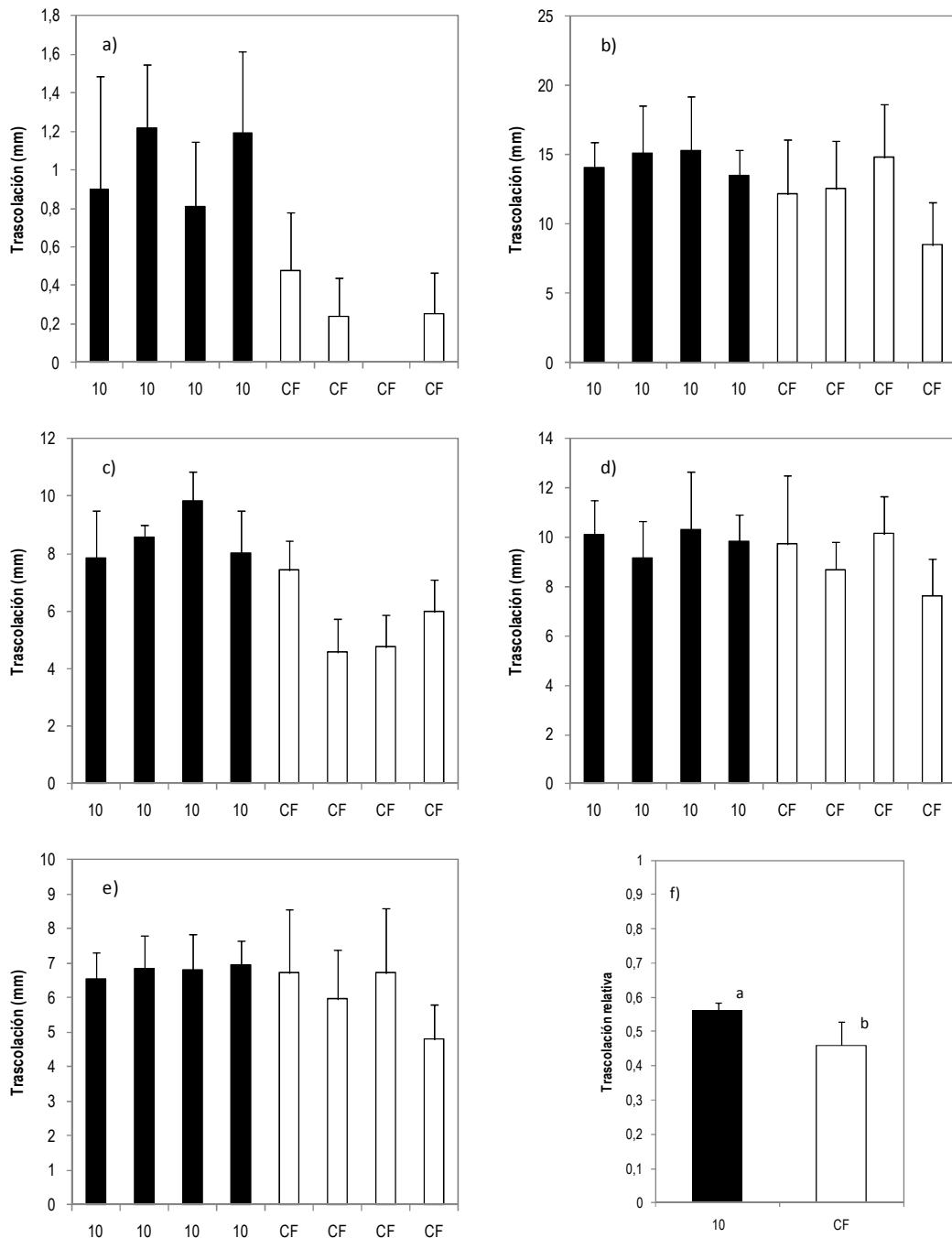


Figura 20. Trascolación media (mm) de los árboles muestreados en los tratamientos 10 y CF (n= 4), según fecha: 01.06.09 (a), 05.06.09 (b), 22.10.09 (c), 02.12.09 (d) y 21.12.09 (e) y para todo el periodo de toma de datos como proporción de la precipitación (f). Se adjuntan además los valores y el resultado del análisis estadístico post-hoc para todo el periodo de toma de datos (letras a y b). Las barras de error representan la desviación estándar positiva.

Otra forma de estudiar el efecto de la densificación de la copa en la trascolación, es mediante un análisis de la relación entre la precipitación y la trascolación según tratamiento (Figura 21). Obsérvese que para ambos casos, la trascolación ha aumentado con la precipitación. Sin embargo, la relación entre las variables no ha sido la misma, con pendientes diferentes según un tratamiento u otro. Las diferencias entre las rectas se encuentran alrededor del 10 %, resultado que de nuevo manifiesta el efecto que tiene la reconfiguración de la copa en la trascolación.

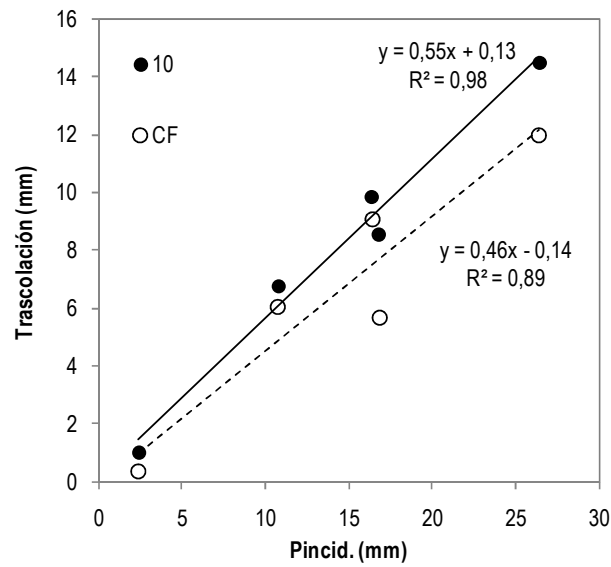


Figura 21. Trascolación media (mm) a nivel de árbol para tratamiento 10 (círculo vacío) y tratamiento CF (círculo relleno) frente a la precipitación exterior (mm). A su vez, se adjuntan las rectas de regresión y sus ecuaciones (10: línea continua; CF: línea discontinua).

En lo que respecta a la escorrentía cortical, a pesar de que no se llevaron a cabo análisis estadísticos por la limitación que supuso el no tener datos fiables hasta octubre, es destacable que para todas las semanas estudiadas, el tratamiento 10 generó mayores caudales que el tratamiento CF (Figura 22). Este resultado pone de manifiesto de nuevo la influencia de la capacidad de saturación, de manera que los árboles con las copas más densas retienen más cantidad de agua y por tanto menos va a parar a escorrentía cortical (Belmonte Serrato et al., 1997).

Aunque los intervalos de tiempo analizados entre la trascolación y la escorrentía cortical no se corresponden y por tanto tampoco las lluvias y las condiciones ambientales, con objeto de presentar un valor aproximado de interceptación media comparable entre los tratamientos, se asumieron estos procesos medidos a la misma escala temporal. Con esta asunción, se puede

decir que la reconfiguración de la copa ha traído consigo un aumento de la interceptación de un 10,3 % con respecto a la precipitación incidente (53,7 % frente a 43,4 %).

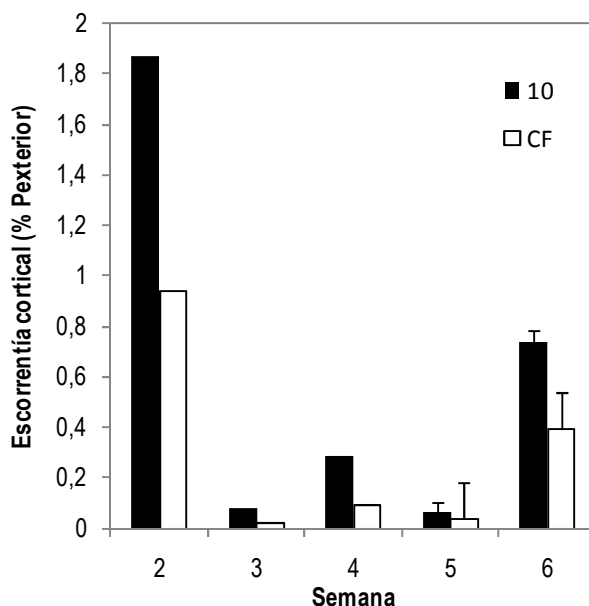


Figura 22. Escorrentía cortical (% de la precipitación exterior) a nivel de árbol. Se adjuntan las barras de error en las semanas a partir de la corrección. A su vez, no se presenta la primera semana por suponer valores nulos para ambos tratamientos.

De los resultados obtenidos en las dos escalas de estudio (masa y árbol) pueden extraerse ciertos aspectos relacionados con la influencia del tiempo en el efecto de la clara. Así, la reconfiguración de la copa del árbol en los tratamientos sin tangencia de copas ha traído consigo un aumento de la cobertura a nivel de masa de un 7 % (Tabla 4, diferencia de FCC entre los tratamientos 10 y CF). Ese aumento de la cobertura se traduce en una reducción del 10 % en la trascolación indirecta (parte de la trascolación que atraviesa el dosel, sin tener en cuenta los huecos en la estructura forestal) o en un ratio de descenso de 150 % de la trascolación indirecta con respecto a la cobertura (7/10). Esto pone de manifiesto la influencia que puede tener la dinámica de la masa en los componentes del ciclo hidrológico.

3.2. Transpiración

Escala masa

A pesar de que el objetivo principal de este apartado es la comparación entre tratamientos a escala masa, se presentan también los resultados a nivel de árbol. Esto hace que podamos estudiar por un lado, la influencia de la silvicultura a dos escalas diferentes y, por otro, el efecto

que tiene extrapolar de una a otra (con el empleo del escalon "índice de área foliar o LAI"). Así, se presenta la transpiración diaria media según árbol (Figura 24) y según masa (Figura 25).

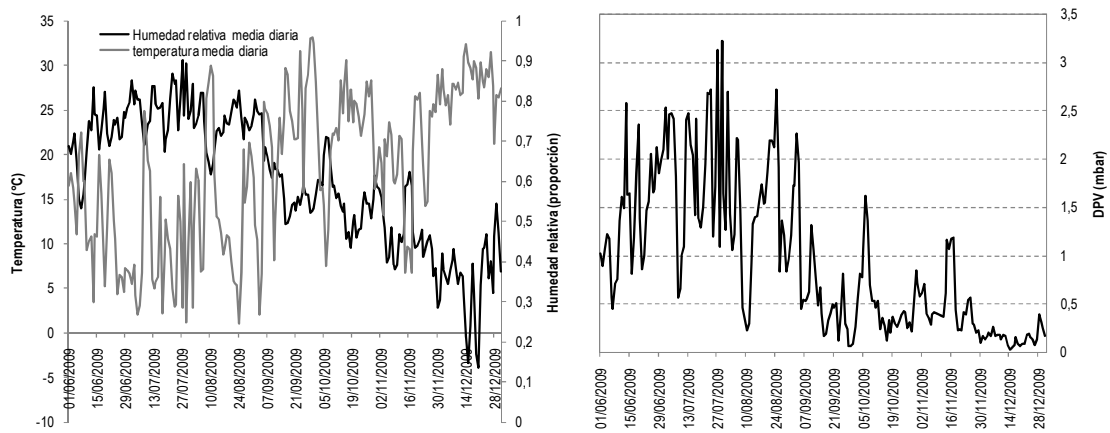


Figura 23. Valores medios diarios para temperatura (°C), humedad relativa (proporción) y déficit de presión de vapor (mbar)

En primer lugar, en lo que se refiere a la escala árbol, cabe destacar que durante todo el periodo de estudio, el tratamiento 10 han mostrado tasas de transpiración muy superiores a los otros dos tratamientos (Figura 24), con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre éste y los demás (véase anejo estadístico). A su vez, los tratamientos 60 y 100 también fueron significativamente diferentes (véase anejo estadístico). Estos resultados ponen de manifiesto que el aclareo (o dicho de otro modo, la liberación de la competencia, Larcher, 1977) ha provocado cambios en las características del micrositio, con presumibles diferencias en el contenido de humedad del suelo (Breda et al, 2001) o la radiación solar que alcanza el dosel (Medhurst et al, 2002) según se considere una cobertura forestal u otra.

A pesar de las diferencias de medias significativas encontradas entre los tratamientos en todo el periodo de estudio, se ha creído conveniente analizar sub-periodos dentro de éste (representados en la Figura 24) con objeto de estudiar la influencia de los factores reguladores de la transpiración (contenido de humedad del suelo, déficit de presión de vapor, regulación estomática, etc.) en las tasas de los diferentes tratamientos. Así, en el primer periodo o verano, el tratamiento 10 ha tenido tasas de transpiración muy elevadas (diferencia de medias entre éste los demás; véase anejo estadístico), mientras que los tratamientos 60 y 100 se han mantenido en valores cuasi constantes y muy cercanos a 0 (Figura 24). Estos resultados confirman que los árboles en los diferentes tratamientos no se comportan de la misma manera durante el periodo estival, de manera que parece lógico estudiar cómo afectan los factores reguladores en cada uno de ellos. Esto último se ha hecho observando la correlación entre el flujo de savia por individuo

(Q) y el déficit de presión de vapor medio diario, DPV, (véase Figura 23 para conocer su dinámica durante el intervalo de estudio y de la humedad y temperatura ambiente) de manera que cuanto mayor sea el grado de asociación entre ellas menor influencia habrá de la parte fisiológica (Morikawa, 1986) y del potencial hídrico en el suelo (Larcher, 1977).

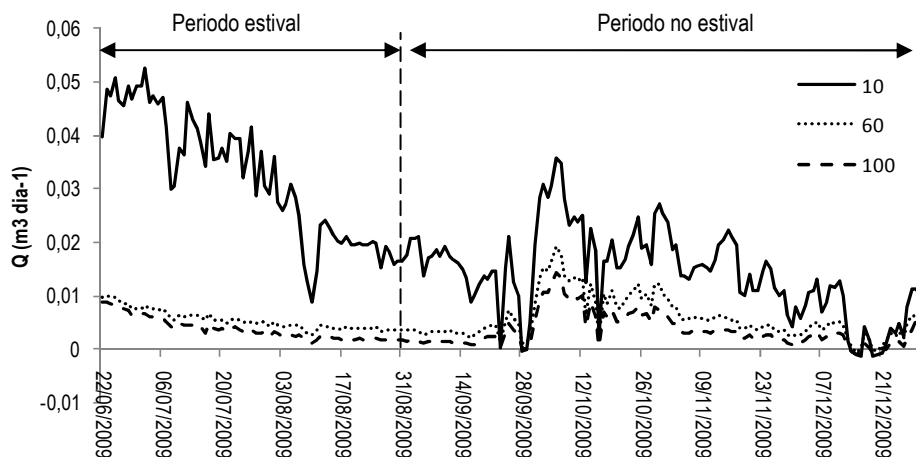


Figura 24. Transpiración media a nivel de árbol ($m^3 \text{ día}^{-1}$) durante el periodo de estudio

Los resultados del análisis de correlación se muestran en la Tabla 9. Según estos resultados, la transpiración en el tratamiento 10 ha tenido menos “restricciones” en verano que la transpiración de los otros dos tratamientos y, a su vez, el 60 menos que el control, de manera que parecen confirmarse los resultados de comparación de medias. Así, la mayor relación entre Q y DPV según el grado de clareo ($10 > 60 > 100$), induce a pensar que el clareo mejora las condiciones de crecimiento de los árboles durante el verano, con más agua disponible en el suelo y menores restricciones fisiológicas.

Tabla 9. Resultados del análisis de correlación de Pearson entre la transpiración (Q) de los árboles de cada tratamiento y el déficit de presión de vapor durante el verano (22 junio-31 agosto 09). Se presenta el valor medio y la desviación típica. Todos los casos resultaron muy significativos ($p < 0,01$). Téngase en cuenta que la velocidad del viento no se midió, de manera que ésta podría haber mejorado las correlaciones encontradas.

Trat.	Correlación media	desviación típica
10	0,59	0,08
60	0,31	0,03
100	0,27	0,00

Con respecto al periodo posterior al verano (1 septiembre- 31 diciembre 2009), los análisis estadísticos (anejo estadístico) mostraron diferencias de medias entre todos los tratamientos entre sí, a pesar de que durante este periodo la transpiración se hizo más similar entre ellos. Una

vez que el suelo se recarga de nuevo tras las primeras lluvias del mes de septiembre, los árboles con mayores “restricciones” durante el verano (60 y 100) transpiran con tasas más altas que las de todo el periodo estival. Sin embargo, en lo que respecta a los árboles del 10, sus tasas de transpiración son menores que las de las primeras semanas de verano. Con todo esto, puede decirse entonces que ha existido un comportamiento diferente de la transpiración según tratamiento, con las mayores transpiraciones para 10 y descendiendo a medida que los árboles experimentan mayor competencia.

En relación a la escala masa, el tratamiento 10 ha transpirado un total de 86,7 mm, lo que supone un 33 % de la precipitación que alcanza el suelo o efectiva (Tabla 10). Los otros dos tratamientos han transpirado cantidades más bajas, con valores de 62,6 y 44,1 mm o 40 y 21,4 % para 60 y 100, respectivamente (Tabla 10).

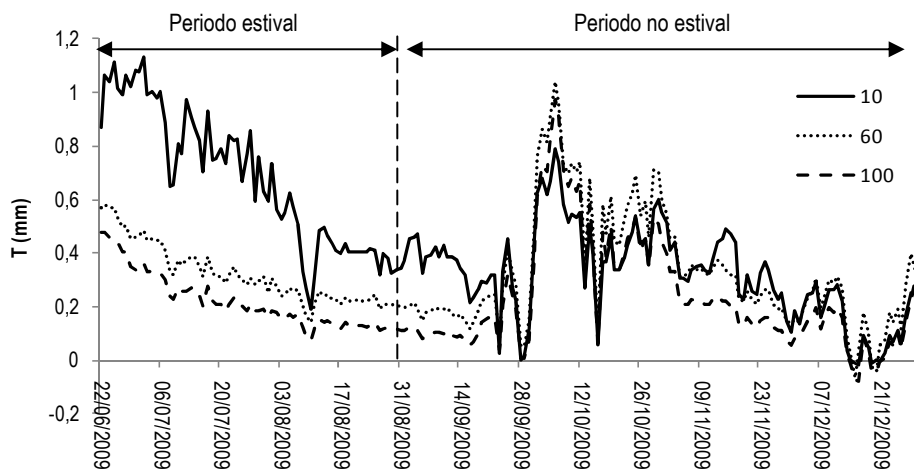


Figura 25. Transpiración a nivel de masa (mm) durante el periodo de estudio

De nuevo, los test estadísticos de comparación de medias desvelaron diferencias entre todos los tratamientos para el periodo completo, estival y el posterior a este último. Así, a pesar del escaso número de árboles de 10 frente a 60 y 100, la transpiración a nivel de masa es mucho mayor para 10 en el periodo estival, con valores muy por debajo para los demás. Durante el periodo posterior al verano (1 septiembre - 31 de diciembre), a pesar de que las diferencias de medias entre los tratamientos se mantienen, es de destacar que la transpiración para este periodo no sigue el mismo patrón encontrado durante el periodo estival. En este caso, el tratamiento 60 presentó el mayor valor (40 mm), seguido del 10 (38 mm) y éste a su vez del tratamiento 100 (29 mm). Con todo lo expuesto puede observarse el efecto que ha tenido el número de pies (LAI), de manera que se han amortiguado las diferencias tan notables a la escala árbol. Este resultado está en concordancia con los encontrados por Morikawa et al. (1986) y Medhurst et al. (2002), ya

que observaron que los cambios producidos por la clara eran diferentes según se estudiase una escala u otra.

Tabla 10. Transpiración total durante el periodo de estudio en lámina de agua (mm) y como porcentaje de la precipitación efectiva (% P.efectiva)

Trat.	T (mm)	% P.efectiva
10	86,7	33,0
60	62,6	40,0
100	44,1	21,4

La hipótesis general de que el clareo reduce la transpiración de la masa en el corto plazo (Morikawa et al., 1986; Bréda et al., 2001; Lagrergen et al., 2008) parece no cumplirse en el intervalo de tiempo analizado en este estudio. Las diferentes interceptaciones de la lluvia durante la primavera (según los tratamientos de clara) pueden haber hecho que el tratamiento 10 con humedad suficiente en el suelo para “responder” al déficit de presión de vapor. Esto puede ser la causa del no cumplimiento de la hipótesis, ya que en este periodo (24 % con respecto al total estudiado) el tratamiento 10 transpiró una cantidad que asciende al 44 % del total. En la etapa posterior al verano, sin embargo, existió una mayor similitud entre los tratamientos. Así, el considerar escalas temporales mayores a la de este estudio puede hacer que el orden entre tratamientos cambie y con ello se cumpla la hipótesis general antes enunciada.

Escala árbol

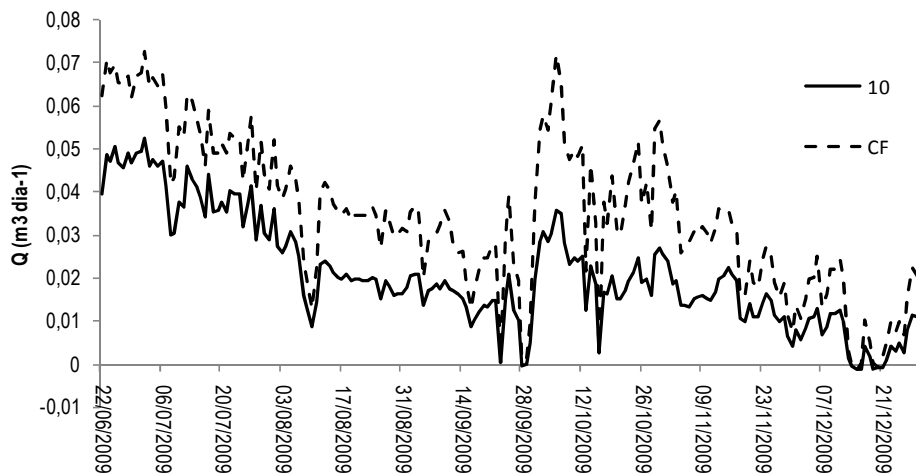


Figura 26. Transpiración de los árboles en el tratamiento 10 y CF

En la Figura 26 se observa que los árboles con las copas más densas han tenido las mayores tasas de transpiración durante todo el intervalo de estudio, resultado avalado por las pruebas de comparación de medias (Figura 27).

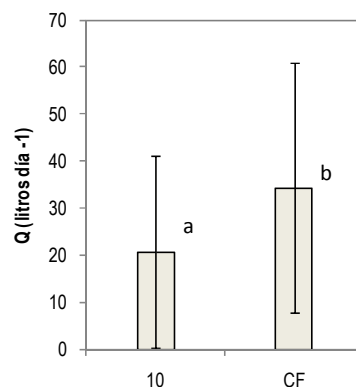


Figura 27. Flujo de savia medio diario (litros día⁻¹) ± desviación estándar de los tratamientos 10 y CF. Las letras representan grupos con medias estadísticamente diferentes.

Sin embargo, cuando estudiamos el proceso a escalas espaciales más pequeñas que árbol, esto es, a nivel de punto (velocidad de los termopares), el proceso se invierte (Figura 28), dando lugar a la explicación de que los árboles de copas más densas consumen más agua por el hecho de que sus áreas xilemáticas o conductoras son de mayor tamaño. Como se desprende de estas consideraciones, los árboles del tratamiento 10 tienen una respuesta fisiológica de mayor magnitud, de manera que el clareo induce cambios fisiológicos que con el tiempo se suavizan.

Como conclusión puede decirse que la evolución de los árboles sin tangencia de copas traerá consigo un incremento de la transpiración de un 27,6 %.

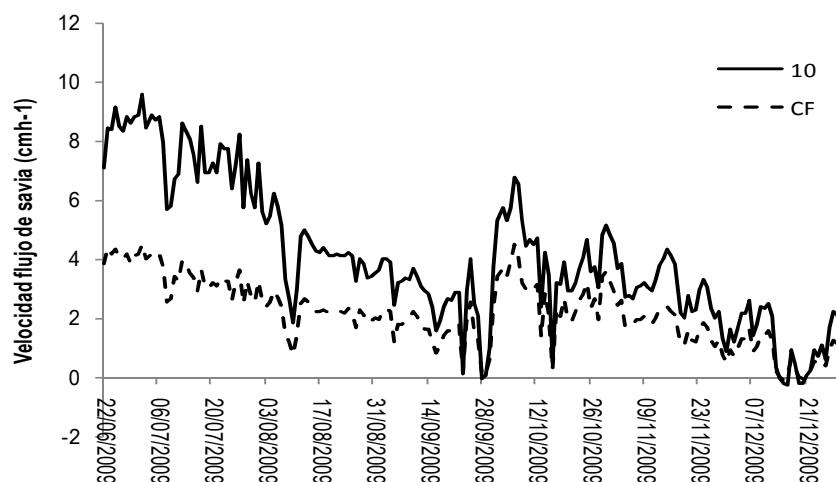


Figura 28. Velocidad de flujo de savia para los tratamientos 10 y CF

3.3. Contenido de humedad del suelo

Calibración de campo de las sondas de humedad

Cuando se analizan las dinámicas de humedad descritas por las sondas, se observa que algunas no registraron datos coherentes, de manera que con la calibración de campo no se corrigen sus lecturas. El contacto suelo-sonda varía a lo largo del año, siendo el momento más importante la desecación ocurrida durante el periodo estival, ya que es aquí donde la sonda suele perder el contacto con el volumen de suelo a su alrededor por contracción de éste (Lab-Ferrer, 21010, comunicación personal). A su vez, fallos en los dataloggers de almacenamiento han generado lagunas importantes en algunas series de datos. Estos dos problemas han sido especialmente importantes en el tratamiento 30, de manera que dicho tratamiento no se presentará en los análisis posteriores.

La calibración de campo ha provocado cambios en las rectas de calibración por defecto más o menos cuantitativos, cuyas regresiones lineales entre los milivoltios de salida de las sondas y los valores de humedad volumétrica real (recuérdese que se muestrearon 4 días para obtener ésta) han tenido un rango de R^2 que va desde 0,72 a 0,99. En la Figura 29 se presentan 8 ejemplos de cómo la calibración de campo ha modificado las rectas de calibración por defecto para el modelo EC-TM (Figura 29.a) y el modelo EC-10 (Figura 29.b). En todos los casos, las nuevas rectas obtenidas han hecho que los valores de las sondas aumenten, de manera que puede decirse

que las ecuaciones por defecto han supuesto una subestimación de la humedad real, como consecuencia de la presencia de elementos gruesos dentro del volumen explorado (Lado, 2010).

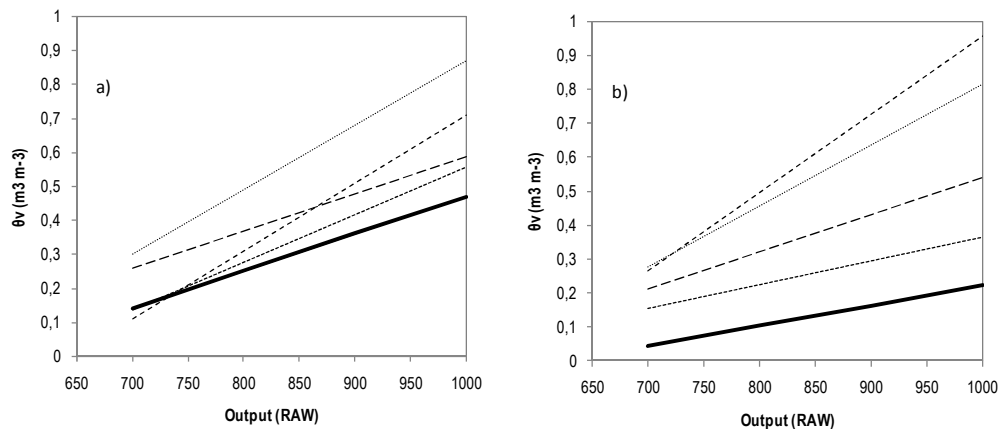


Figura 29. Rectas de calibración por defecto (negrita) para las sondas EC-TM (a) y EC-10 (b) y rectas modificadas (líneas con discontinuidad) según calibración de campo

Antes de entrar en la comparación entre tratamientos y con objeto de mostrar la variabilidad encontrada en los datos de las sondas según tratamiento, se ha creído conveniente presentar un ejemplo con 3 dinámicas de humedad en el tratamiento 100 (Figura 30). Este tratamiento representa la estructura forestal más homogénea en términos de vuelo, de forma que la dispersión en los datos de humedad del suelo debería ser la menor de todos los tratamientos. A pesar de esto, se observa que las dinámicas del contenido de humedad son bastante dispares, con valores diferentes según se considere una u otra. Además de esto, En la Figura 30 se presentan también las fechas seleccionadas para la comparación de medias entre tratamientos.

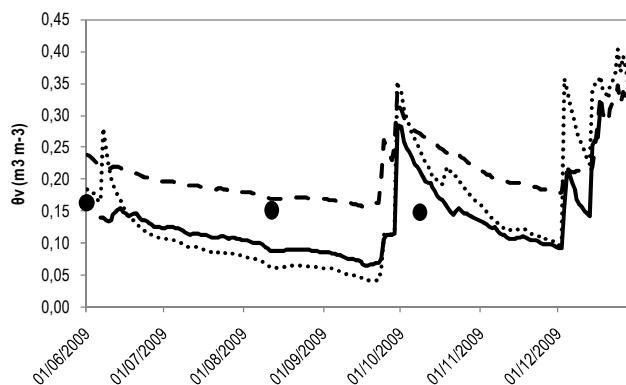


Figura 30. Dinámica de la humedad del suelo diaria ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para 3 sondas seleccionadas para el tratamiento 100.

Se presentan también las fechas (01.06.09, 05.08.09, 05.10.09) en las que se realizaron las comparaciones de medias entre los tratamientos (círculos rellenos).

Escala masa

En la Figura 31 se presentan las dinámicas de humedad diaria para los tratamientos, calculadas de acuerdo a la cobertura vegetal. La comparación de medias resultó significativa (anexo estadístico) sólo para la fecha del 01.06 y entre los tratamientos 10 y 60, con una diferencia de 20,5 mm entre sus contenidos de humedad. Destaca que el tratamiento 10 ha mostrado los mayores valores en todo el periodo de estudio, exceptuándose los momentos de recarga del suelo, donde los tratamientos 60 y 100 lo superaron. Este resultado discrepa con los encontrados en la partición de la lluvia, ya que es en el tratamiento 10 donde se esperan las mayores trascolaciones de lluvia.

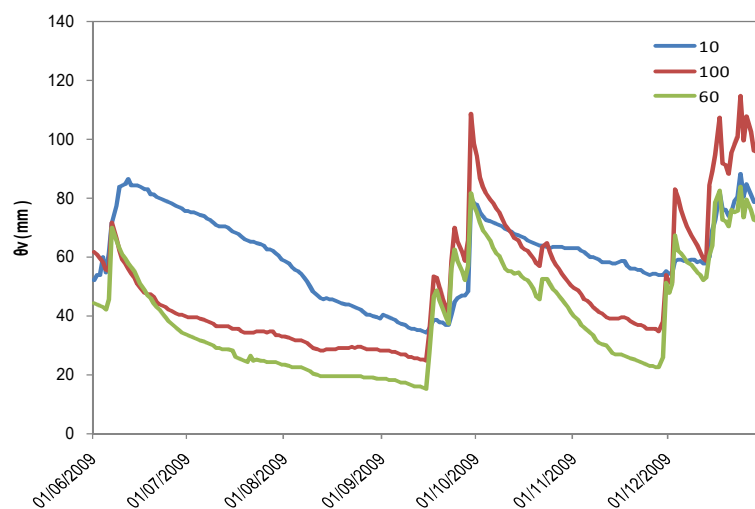


Figura 31. Dinámica del contenido de humedad del suelo medio (mm) para los tratamientos

A raíz de esto último, se analizó el contenido de humedad del suelo sin tener en cuenta ciertas sondas, de manera que se presenta un ejemplo en la figura 32 (sin considerar las sondas “sin influencia directa”). Tal y como se desprende de ella, el tratamiento 10 sí parece responder de forma adecuada a las recargas por lluvia cuando sólo se consideran las sondas “con influencia de árbol” (6 sondas). Sin embargo, la comparación de medias entre las sondas “con influencia de árbol” resultó no significativa entre ninguno de los tratamientos, resultado contradictorio con los encontrados en transpiración. Estos hechos ponen de manifiesto la complejidad que tiene extraer conclusiones fiables de estas mediciones, las cuales pueden verse afectadas por muchos factores no controlados en el diseño experimental (elementos gruesos dentro del volumen explorado, goteo puntual, canales preferenciales de agua, etc.).

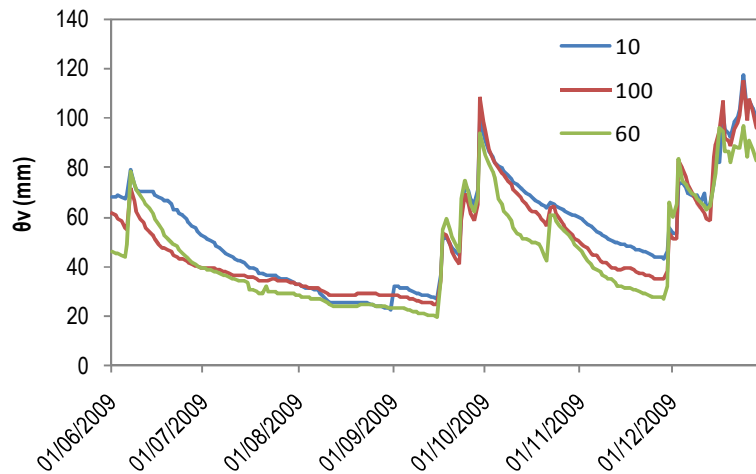


Figura 32. Dinámica del contenido de humedad medio (mm) para las sondas “bajo influencia de árbol” de los tratamientos

Escala árbol

Si bien las dinámicas de humedad de los tratamientos 10 y CF parecen distintas (Figura 33), la comparación de medias resultó ser no significativa en ninguna de las 3 fechas testadas (anexo estadístico). A pesar de ello, los resultados presentados guardan una mayor correspondencia con lo ocurrido en los otros procesos hidrológicos (“partición de la lluvia” y “transpiración”) que los resultados mostrados en el epígrafe anterior. Así, las recargas presentadas en el tratamiento 10 son siempre mayores que las del tratamiento CF (efecto de la partición de la lluvia). Sin embargo, en lo que respecta a la transpiración, no puede decirse que exista una diferencia clara entre los tratamientos, con pendientes algo diferentes en el periodo estival pero muy similares en el periodo posterior a éste.

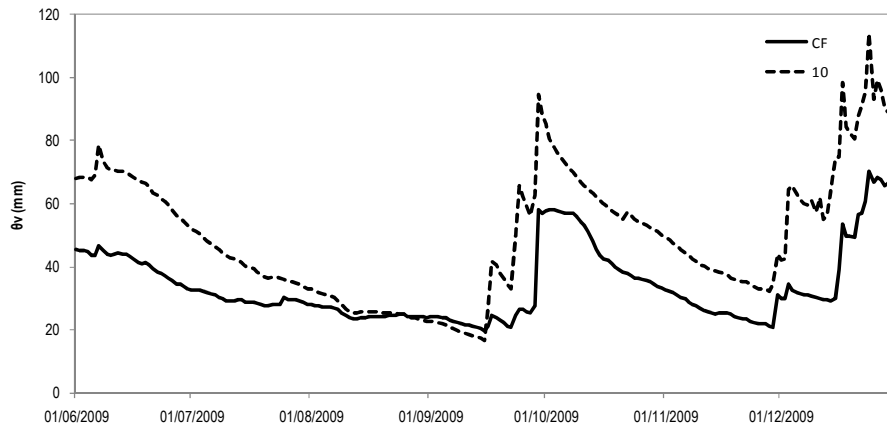


Figura 33. Dinámica del contenido de humedad del suelo medio (mm) para los tratamientos 10 y CF

3.4. Modelación simple de las relaciones hidrológicas bosque-agua

En este apartado se sintetizan (o amplían en algunos casos) los resultados obtenidos hasta ahora. Se presentarán modelos simples para cada relación bosque-agua y de acuerdo a las dos escalas espaciales tenidas en cuenta en este trabajo: escala masa y escala árbol.

Escala masa

Partición de la lluvia

La lluvia (P_g) que es interceptada (I_t , %) por las distintas cubiertas forestales vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$I_t = 27,04 \cdot LAI^{0,54}$$

donde LAI es el índice de área foliar de las diferentes cubiertas forestales ($0 \leq LAI \leq 2,8$), convertible a cobertura según (Molina y del Campo, 2010, en revisión): $LAI = 0,0318 \text{ FCC}$ ($R^2 = 0,98$).

El resto de lluvia que no es interceptada ($P_g - I_t$) irá a parar a precipitación efectiva.

Transpiración

Para la modelización de la transpiración diaria (T_{trat} , mm) se han tenido en cuenta los datos diarios de contenido de humedad del suelo (intervalo óptimo entre 90 y 40 mm; entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente), de déficit de presión de vapor y la relación de éstos con la transpiración de los tratamientos. Así, se han considerado 3 periodos bien diferenciados: periodos desfavorables (0), periodos óptimos para transpirar (1) y periodos sin transpiración (2).

Los periodos para las estructuras forestales más aclaradas (tratamiento 10) se especifican en la Figura 34.A, mientras que para 60 y 100 se muestran en la Figura 34.B. Obsérvese que no coinciden en el tiempo, de manera que para 10 existe un lapso temporal mayor de periodo óptimo de transpiración. Por otro lado, parece lógico pensar que no debería considerarse todo el periodo estival como “no favorable” para los tratamientos 60 y 100, ya que la humedad es mayor que 40 mm en varios días del mes de junio. Sin embargo, con el análisis de asociación entre transpiración y DPV para esos días (datos no mostrados), se observó que la transpiración se movía en torno a un valor constante de 0,4 mm para ambos tratamientos, de manera que puede asumirse que existe una regulación fisiológica y que por tanto la transpiración se encuentra limitada por factores ajenos a la humedad del suelo.

Las ecuaciones que describen el periodo óptimo (1) según tratamiento son:

$$T_{10} \text{ (mm)} = 0,296 \cdot \ln \text{ DPV (mbar)} + 0,693 \text{ (R}^2 = 0,85; \text{ S} = 0,11 \text{ mm)}$$

$$T_{60} \text{ (mm)} = 0,287 \ln \text{ DPV (mbar)} + 0,771 \text{ (R}^2 = 0,71; \text{ S} = 0,14 \text{ mm)}$$

$$T_{100} \text{ (mm)} = 0,284 \ln \text{ DPV (mbar)} + 0,673 \text{ (R}^2 = 0,69; \text{ S} = 0,13 \text{ mm)}$$

Para el periodo desfavorable (0), se ha asumido que el valor medio de la transpiración diaria es un buen estimador, de manera que no se ha considerado su modelación en función del DPV. Se tiene, según tratamiento:

$$T_{10} \text{ (mm)} = 0,51 \pm 0,18$$

$$T_{60} \text{ (mm)} = 0,24 \pm 0,04$$

$$T_{100} \text{ (mm)} = 0,14 \pm 0,05$$

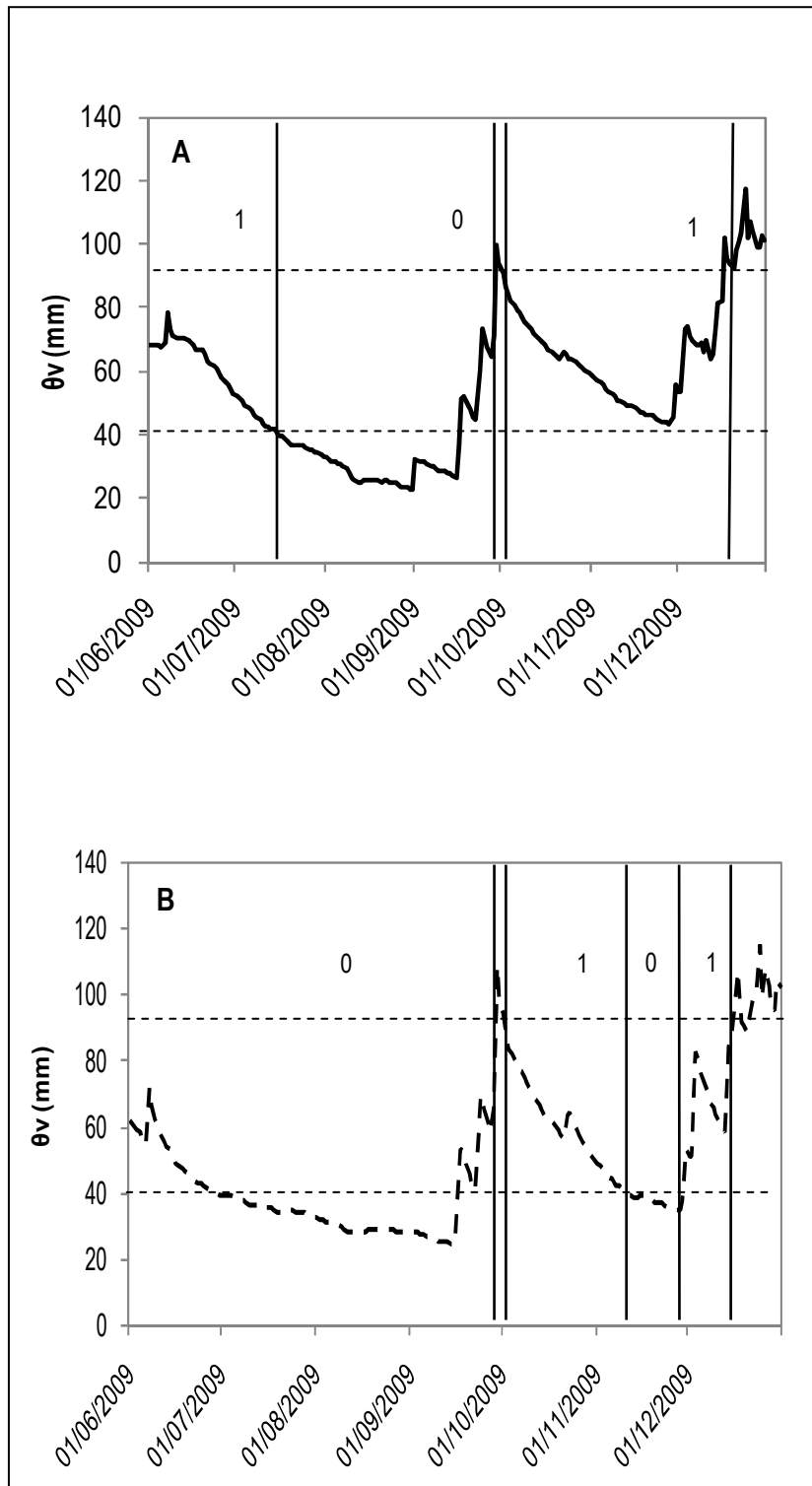


Figura 34. Periodos desfavorables (0) y óptimos (1) para tratamiento 10 (A) y para tratamientos 60 y 100 (B). Los periodos sin número se corresponden con el periodo sin transpiración (2).

Escala árbol

Partición de la lluvia

En este caso, sólo se presentarán las ecuaciones obtenidas para la trascolación ($T_{\text{trat},\text{mm}}$), ya que es aquí donde se encontró una relación lineal positiva clara con la precipitación (mm). Para el caso de la escorrentía cortical, por el contrario, no se encontró significancia estadística (pendiente no diferente a 0) entre lámina de agua (mm) y precipitación (mm) (datos no mostrados). Esto último puede ser debido a que el proceso depende en mayor medida de aspectos tales como la intensidad y la duración de las lluvias (Crockford y Richardson, 2001).

Tenemos que la trascolación según tratamiento queda de la siguiente forma:

$$T_{C_{10}}(\text{mm}) = 0,55P_g + 0,13 \quad (R^2 = 0,98; S = 0,84 \text{ mm})$$

$$T_{C_{cf}}(\text{mm}) = 0,46 P_g - 0,10 \quad (R^2 = 0,90; S = 1,60 \text{ mm})$$

Transpiración

La transpiración a nivel de árbol se ha analizado de la misma forma que en el caso anterior. Así, se reconocen los mismos periodos (0, 1, 2) para 10 (Figura 35), mientras que para CF quedan se modificaron ligeramente. Obsérvese que para el tratamiento CF no existen periodos sin transpiración (2).

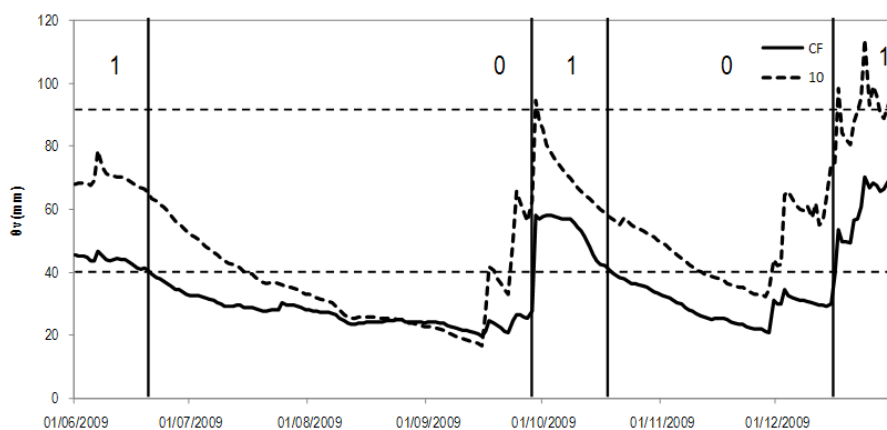


Figura 35. Periodos de transpiración para el tratamiento CF. Se presentan las dinámicas del contenido de humedad para 10 y CF.

Las ecuaciones que describen el periodo óptimo (1) según tratamiento son:

$$T_{10} \text{ (m}^3\text{)} = 0,014 \cdot \ln \text{DPV (mbar)} + 0,033 \text{ (R}^2 = 0,85; \text{S} = 0,005 \text{ m}^3\text{)}$$

$$T_{cf} \text{ (m}^3\text{)} = 0,020 \cdot \ln \text{DPV (mbar)} + 0,060 \text{ (R}^2 = 0,90; \text{S} = 0,007 \text{ m}^3\text{)}$$

Para el periodo desfavorable (0), se ha asumido de nuevo que el valor medio de la transpiración diaria es un buen estimador. Se tiene, según tratamiento:

$$T_{10} \text{ (m}^3\text{)} = 0,014 \pm 0,001$$

$$T_{cf} \text{ (m}^3\text{)} = 0,040 \pm 0,001$$

4. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES FUTURAS

- La clara ha tenido un efecto a corto plazo en la partición de la lluvia, de manera que las estructuras forestales sin intervención han presentado las mayores tasas de interceptación (54 % respecto a la precipitación). A su vez, las masas con mayor intervención han supuesto las mayores cantidades de agua alcanzando el suelo (82 % de precipitación efectiva).

- La reconfiguración de la copa ha modificado el patrón en la partición de la lluvia, de manera los árboles con mayor desarrollo han presentado tasas de interceptación un 10 % superiores. Esto último pone de manifiesto que la modificación de la capacidad de saturación del vuelo trae consigo cambios en la trascolación indirecta y la escorrentía cortical.

- La clara ha supuesto una modificación de la transpiración tanto a escala árbol como a escala masa. Durante casi todo el periodo de estudio ha existido un gradiente en los valores de transpiración, con los mayores valores para el tratamiento más intenso y los menores para las zonas sin tratar. Teniendo en cuenta todo el periodo de análisis, se ha encontrado una diferencia entre estos dos de casi el doble.

Las masas tratadas con intensidad baja se han comportado de forma intermedia entre ambos, pero con transpiraciones superiores a las zonas sin tratar que ascienden a un 42 %.

- Los resultados de transpiración no van en la línea de lo reportado en la bibliografía. Esto puede ser debido al intervalo seleccionado para este estudio, con un periodo de sequía bien marcado. Es necesario contar al menos con un año hidrológico completo para corroborarlos o en caso contrario encontrar diferencias estacionales entre los tratamientos de clara.

- Al comparar los resultados entre la escala árbol y la escala masa, se ha observado la importancia que puede tener el tiempo transcurrido desde la intervención, siendo más importante si cabe si el objetivo de la silvicultura es de tipo hidrológico.

- Las ecuaciones aquí presentadas representan una aproximación somera a la modelización de las relaciones bosque-agua y el efecto de una intervención selvícola. Es necesario un mayor volumen de datos para poder obtener modelos más representativos y con mayor capacidad predictiva, de manera que éstos recojan la posible variabilidad de los factores que influyen en los procesos hidrológicos estudiados.

- No se ha tenido en cuenta la evaporación directa desde suelo. Según la literatura, esta variable es muy susceptible de ser modificada con la intervención, de manera que es imprescindible su medición o estimación en posteriores estudios.
- Las sondas de medición del contenido de humedad del suelo parecen recoger bien los valores extremos encontrados en el perfil del suelo. Sin embargo, sus datos no se han correspondido bien con los resultados encontrados en las relaciones bosque-agua.
- Es necesario contar con mediciones de transpiración en el tratamiento moderado o 30 para poder tener así una muestra más representativa de las posibles estructuras forestales en las plantaciones mediterráneas del género *Pinus*.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboal, J.R., Jimenez, M.S., Morales, D., Gil, P., 2000. Effects of thinning on throughfall in Canary Islands pine forest – The role of fog. *J. Hydrol.* 238, 218–230.
- Alarcón, M., 2010. Influencia de la intensidad de las claras en la transpiración en *Pinus halepensis* en masas repobladas con exceso de densidad. Trabajo profesional fin de carrera. UPV. España.
- Asdak, C., Jarvis, P., van Gardingen, P., Fraser, A., 1998. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology.* 206, 237-244.
- Aussenac, G., Granier, A., 1988. Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 18, 100-05.
- Barret, D.J., Hatton, T.J., Ash, J.E., Ball, M.C., 1994. Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of south-eastern Australia. *Plant, Cell and Environment.* 18, 463-469.
- Belmonte Serrato, F., 1997. Interceptación en bosque y matorral mediterráneo semiárido: Balance hídrico y distribución espacial de la lluvia neta. Murcia: Universidad de Murcia, Tesis Doctoral.
- Belmonte Serrato, F.; Romero Diaz, A., López Bermudez, F., Hernández Laguna, E., 1999. Óptimo de cobertura vegetal en relación a las pérdidas de suelo por erosión hídrica y las pérdidas de lluvia por interceptación. *Papeles de Geografía.* 30, 5-15.
- Bonan, J., 2008. Forest and climate change: Forcings, feedbacks, and the Climate benefits of forests. *Science.* 320, 1443-1449.
- Brooks, K. N., Folliott, P. F., Gregersen, H. M., DeBano, L. F., 2003. *Hydrology and the Management of Watersheds.* Iowa. Iowa State Press. 575 p.
- Bosch, J. M., Hewlett, J. D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology.* 55, 3-23.
- Burgess, S., Adams, M., Turner, N., Beverly, C., Ong, C., Khan, A., Bleby, T., 2001. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree physiology.* 21, 589-598.
- Breda, N., Granier, A., Aussenac, G., 2001. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree physiology.* 15, 295-306.

- Calder, I., 1986. A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*. 89, 65–71.
- Calder, I. R., 2002. Forests and Hydrological Services: Reconciling public and science perceptions*. *Land Use and Water Resources Research*. 2, 1-12.
- Calder, I. R., 2003. Forests and Water - Closing the gap between public and science perceptions. Estocolmo. Stockholm Water Symposium.
- Ceballos, L., 1938. Regresión y óptimo de la vegetación en los montes españoles. Avila. Significación de los pinares.
- Cervelló Royo, J., 2008. Estudio climatológico del monte V-1007 de La Hude y la Palomera en el término municipal de Ayora (Valencia). Valencia: Proyecto de Fin de Carrera de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L., 1994. Hidrología aplicada. Mc-Graw- Hill. Colombia. 584 p.
- Cobos, D., 2007. Calibrating ECH₂O soil moisture sensors. Application note. Decagon Devices. USA.
- Cohen, Y., Cohen, S., 2008. Variations in the radial gradient of sap velocity in trunks of forest and fruit trees. *Plant Soil*. 305, 45-59.
- Crockford, R. H., Richardson, D. P., 1990. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia. II. Stemflow and factors affecting stemflow in a drysclerophyll eucalypt forest and a *Pinus radiata* plantation. *Hydrology Processes*. 4, 145-155.
- Crockford, R. H., Richardson, D. P., 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effects of forest type, ground cover and climate. *Hydrological processes*. 14, 2903-2920.
- Decagon Devices, 2002. USA. www.decagon.com.
- Del Campo, A.D, Aguilera, A., Lidón, A., Segura, G., 2008. Influencia del tipo y dosis de hidrogel en las propiedades hidrofísicas de tres suelos forestales de distinta textura. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 25, 137-143.
- Estrela, T., Marcuello, C., Dimas, M., 2000. Las aguas continentales en los países mediterráneos de la Unión Europea. Centro de estudios Hidrográficos del CEDEX, M. Fomento, M. Medio Ambiente, España.
<http://hercules.cedex.es/Hidrologia/pub/doc/aguaconfinal.pdf>.

- FAO, 2005. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. Roma.
- Franco, M., 2009. Evaluación de la trascolación en masas de *Pinus halepensis* en condiciones mediterráneas. Trabajo profesional fin de carrera. UPV. España.
- Gash, J., 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quart. J. R. Met. Soc.* 105, 43-55.
- Gash, J., Lloyd, C., Lachaud, G., 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*. 170, 79–86.
- Gallart, F., Llorens, P., 2003. Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth*. 29, 769-773.
- Hanchi, A., Rapp, M., 1997. Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management*. 97, 231-235.
- Herbst, M., Rosier, P., Macneil, D., Harding, R., 2008. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148, 1655–1667.
- Hibbert, A.R., Davis, E.A., Knipe, O.D., 1982. Water yield changes resulting from treatment of Arizona chaparral. In *Dynamics and management of Mediterranean-type ecosystems*, tech. coords. C.E. Conrad and W, C. Oechel. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PSW-58
- Horton, R. E., 1919. Rainfall interception. *Monthly Weather Review*. 47, 603-623.
- Huber, J., Oyarzún, C., 1984. Factores reguladores de la intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata*. *Bosque*. 2, 59-64.
- Hewlett, J. D., 1982. *Principles of Forest Hydrology*. Athens, Georgia. University of Georgia Press. 183 p.
- ICT International, 2006. Heat Ratio Method (HRM) Installation & Operation Manual. Armidale NSW 2350, Australia. 125 pp.
- IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. The Physical Science Basis. United Nations Environment Programme.
- Kimmins, J.P., 2004. *Forest ecology: a foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry*. 3rd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 596 p.

- Klaasen, W., Bosveld, F., de Water, E., 1998. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of hydrology*. 212-213, 36-50.
- Lado, L., 2010. Efectos de tratamientos selvícolas sobre la temperatura y la humedad del suelo en parcelas de pino carrasco. Trabajo Fin de Máster. Departamento de IHMA. UPV. España.
- Lagergren, F., Lankreijer, H., Kucˇera, J., Cienciala, E., c, Mořlder, M., Lindroth, A., 2008. Thinning effects on pine-spruce forest transpiration in central Sweden. *Forest ecology and management*. 255, 2312–2323.
- Larcher, W., 1977. *Ecofisiología vegetal*. Barcelona. Ediciones Omega. 305 p.
- Laurent, M., Antoine, N., Guiot, J., 2003. Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecology and Management*. 183, 47–60.
- Leblanc, S. G., Chen, J. M., 2001. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 110, 125–139.
- Li-Cor, 1991. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer Operating Manual. Lincoln, Nebraska, EE.UU. LI-COR Inc.
- López-Serrano F.R., Landete, T., Martínez, J., Cerro, A., 2000. LAI estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique. *Agric. For. Meteorol.* 101, 95–111.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J., Gallart, F., 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*. 199, 331-345.
- Llorens, P., Domingo, F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*. 335, 37– 54.
- Lloyd, C.R., Marques, A., 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and forest meteorology*. 42, 63-73.
- Martínez de Azagra, A., Navarro Hevia, J., 1996. *Hidrología forestal: El ciclo hidrológico*. Valladolid. Universidad de Valladolid. 286 p.
- Marshall, D., 1958. Measurements of sap flow in conifers by heat transport. *Plant physiology*. 33 (6), 385-395.
- Merdhurst, J., Battaglia, M., Beadle, C., 2002. Measured and predicted changes in tree and stand water use following high intensity thinning of an 8-year-old *Eucalyptus nitens* plantation. *Plant physiology*. 22, 775- 784.

- MMARM, 2006. Anuario de Estadísticas Forestales 2006. http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/montes_politica_forestal/estadisticas_forestal/indice_estadisticas_forestales_2006.htm
- Molina, A., 2008. Relación entre la intensidad de los claros en masas coetáneas de *Pinus halepensis* y la interceptación de la precipitación: Estudios preliminares. Trabajo Profesional Fin de Carrera. Universidad de Córdoba. España.
- Molina, A., del Campo, A., 2010. Estimación del Índice de área foliar en pinares de repoblación con LAI-2000 bajo radiación solar directa: relación con variables de inventario e hidrológicas. Enviado a Forest systems.
- Morikawa, Y., Hattori, S., Yoshiyoki, P., 1986. Transpiration of a 31-year-old *Chamaecyparis obtusa* Endl. stand before and after thinning. Tree physiology, 2, 105-114.
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J.J., Domingo, F., Gash, J.H., 2009. A review of rainfall interception modeling. Journal of hydrology. 370. 191- 206.
- ONU, 2009. The United Nations World Water Development Report 3. Water in a changing world.
- Pimentel, J. L., Velázquez, M., 2008. Los conflictos por el agua y los límites a la participación de los regantes en el río Júcar, Valencia, España. Relaciones 116. 29, 63-85.
- Rivas Martínez, S., 1987. Mapa de series de vegetación de España 1:400.000 y memoria. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Rodrigo, A., Ávila, A., 2001. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean Holm forests. Journal of Hydrology. 243, 216-227.
- Ruiz de la Torre, J., 1990. Mapa forestal de España: Memoria general: Escala 1: 200.000. Madrid: ICONA.
- Teklehaimanot, Z., Jarvis, P.G., Ledger, D.C., 1991. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing. J. Hydrol. 123, 261–278.
- Savé, R., Heralde, Biel, C., 2005. Aproximación al ciclo del agua en ecosistemas forestales. Invest Agrar: Sist Recur For. 14(3), 497-512.
- Scarascia-Mugnozza, G., Oswald H., Piussi, P., Radoglou K., 2000. Forests of the Mediterranean region: gaps in knowledge and research needs. Forest Ecology and Management. 132, 97-109.

- Valente, F., David, J., Gash, J., 1997. Modeling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of hydrology* 190, 141-162..
- Van Dijk, A. I., Keenan, R. J., 2007. Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management*. 251, 1-9.
- Velez, R., 1990. Preventing forest fires through silviculture. *Unasyuva*. 162.
<http://www.fao.org/docrep/t9500E/t9500e03.htm#preventing%20forest%20fires%20through%20silviculture>.
- Veracion, V., Lopez, A., 1976. Rainfall interception in an thinned Benguet pine forest stand. *Sylvatrop* 1 (2), 128-134.
- Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R. B., 2000. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*. 289, 284-288.
- Welles, J. M., Cohen, S., 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany*. 47 (202), 1335-1342.
- Zhang, L., Dawes, W., Walker, G., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*. 37, 701-708

6. ANEJOS

6.1. Datos complementarios

Tabla 11. Trascolución semanal de cada uno de los tratamientos, ordenada cronológicamente (de la semana 1 a la 6)

<i>Pincid.(mm)</i>	<i>Trat.</i>	<i>Trascolución (mm)</i>	<i>Trascolución (% Pincid.)</i>
	10	9,86	68,44
	30	6,11	42,43
	60	6,82	47,36
14,4	100	5,47	38,01
	10	10,15	92,27
	30	9,76	88,73
	60	8,40	76,39
11,0	100	8,26	75,12
	10	8,27	79,54
	30	5,83	56,10
	60	6,08	58,43
10,4	100	5,35	51,48
	10	16,89	105,55
	30	12,92	80,74
	60	13,90	86,90
16,0	100	11,94	74,62
	10	13,17	78,27
	30	9,11	54,11
	60	8,88	52,77
16,8	100	7,89	46,90
	10	13,25	71,24
	30	11,09	59,64
	60	9,41	50,61
18,6	100	8,87	47,66

Tabla 12. Valores de escorrentía cortical de cada uno de los tratamientos en: volumen (l), mm (medio-Med., máximo –Máx.- y mínimo –Mín.-) y como % de la precipitación incidente según método aplicado. Las semanas están ordenadas cronológicamente (de la 1 a la 6) según orden de aparición

Pincid.(mm)	Trat.	Vol. (l)	Método 1				Método 2			
			Med.	Máx.	Mín.	% Pincid.	Med.	Máx.	Mín.	% Pincid.
14,4	10	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
	30	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
	60	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
	100	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
11,0	10	2,78	-	0,05	-	0,45	-	0,06	-	0,54
	30	3,11	-	0,15	-	1,35	-	0,15	-	1,40
	60	2,73	-	0,20	-	1,85	-	0,23	-	2,10
	100	4,99	-	0,74	-	6,75	-	0,51	-	4,66
10,4	10	0,14	-	0,00	-	0,02	-	0,00	-	0,04
	30	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
	60	0,03	-	0,00	-	0,02	-	0,00	-	0,01
	100	0,10	-	0,01	-	0,14	-	0,01	-	0,09
16,0	10	0,61	-	0,01	-	0,07	-	0,01	-	0,08
	30	0,68	-	0,03	-	0,20	-	0,03	-	0,21
	60	0,89	-	0,07	-	0,42	-	0,08	-	0,47
	100	2,88	-	0,43	-	2,68	-	0,30	-	1,85
16,8	10	0,17	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,02
	30	0,46	0,02	0,06	0,00	0,13	0,03	0,07	0,00	0,15
	60	0,06	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02
	100	0,15	0,02	0,05	0,00	0,14	0,02	0,03	0,00	0,10
18,6	10	2,11	0,04	0,05	0,03	0,20	0,04	0,05	0,04	0,24
	30	1,73	0,08	0,15	0,04	0,45	0,09	0,17	0,03	0,49
	60	0,88	0,07	0,10	0,04	0,35	0,06	0,11	0,03	0,33
	100	1,72	0,26	0,44	0,09	1,37	0,20	0,39	0,06	1,09

6.2. Resultados estadísticos

A. Partición de la lluvia (escala masa):

- Homogeneidad de varianzas para la comparación de medias entre la trascolación de los tratamientos (test de Levene) a escala global

Estadístico de				
Levene	gl1	gl2		Sig.
	1,807	3	7	,234

- Comparación de medias entre la trascolación de los tratamientos de clara un año después de la aplicación a escala global

ANOVA					
Inter-grupos	1191,771	3	397,257	11,602	,004
Intra-grupos	239,680	7	34,240		
Total	1431,451	10			

- Post- Hoc (Test de Tukey) tras la comparación de medias entre la trascolación de los tratamientos de clara un año después de la aplicación a escala global

Subconjunto para alfa = 0.05				
VAR00001	N	1	2	
100,00	3	55,24		
60,00	3	62,86		
30,00	2	63,99		
10,00	3		82,41	
Sig.		,378		1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- Resultados del ajuste de la función potencial con LAI como variable independiente e interceptación global (%) como variable dependiente

Resumen del modelo				
R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación	
,909	,826	,807	,184	

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	1,453	1	1,453	42,691	,000
Residual	,306	9	,034		
Total	1,759	10			

Coeficientes						
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados			
	B	Error típico	Beta	t	Sig.	
ln(VAR00001)	,540	,083		,909	6,534	,000
(Constante)	27,041	1,658			16,314	,000

Estadísticos sobre los residuos ^a					
	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típ.	N
Valor pronosticado	18,69	48,85	34,40	10,646	11
Residuo bruto	-8,351	13,509	,000	6,530	11
Valor pronosticado tip.	-1,476	1,357	,000	1,000	11
Residuo tip.	-1,213	1,963	,000	,949	11

B. Partición de la lluvia (escala árbol: comparativa entre 10 y CF)

- Para el periodo completo (variable trascolación en % de Pincid.)

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,162	1	673	,281

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	2170627951 225551,000	1	2170627951 225551,000	10,278	,001
Intra-grupos	1421346769 54130100,0	673	2111956566 92615,400		
Total	1443053049 05355700,0	674			

- Día 1 junio 2009 (trascolación en mm)

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,629	1	106	,430

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	4,045	1	4,045	60,155	,000
Intra-grupos	7,128	106	,067		
Total	11,173	107			

- Día 5 junio 2009 (trascolación en mm)

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
8,445	1	141	,004

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	222,981	1	222,981	16,395	,000
Intra-grupos	1917,715	141	13,601		
Total	2140,696	142			

- Día 22 octubre 2009 (trascolación en mm)

- **Prueba de homogeneidad de varianzas**

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,190	1	138	,277

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	285,056	1	285,056	121,304	,000
Intra-grupos	324,292	138	2,350		
Total	609,348	139			

- Día 2 diciembre 2009 (trascolación en mm)

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
3,724	1	137	,056

ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	22,708	1	22,708	6,075	,015
Intra-grupos	512,070	137	3,738		
Total	534,778	138			

- Día 21 diciembre 2009 (trascolación en mm)

Rangos

	trat_2	N	Rango promedio
mm	1,00	71	58,56
	10,00	71	84,44
	Total	142	

	mm
Chi-cuadrado	14,059
gl	1
Sig.	0,000

- Regresión lineal para 10 entre trascolación (mm) y precipitación (mm)

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,989 ^a	,978	,971	,841

ANOVA ^b						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	93,865	1	93,865	132,779	,001 ^a
	Residual	2,121	3	,707		
	Total	95,986	4			

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	,303	,778		,390	,723
	VAR00001	,557	,048	,989	11,523	,001

- Regresión lineal para CF entre trascolación (mm) y precipitación (mm)

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,945 ^a	,893	,857	1,639

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	67,172	1	67,172	25,004	,015 ^a
	Residual	8,059	3	2,686		
	Total	75,231	4			

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	-,007	1,516		-,004	,997
	VAR00001	,471	,094	,945	5,000	,015

C. Comparación de medias (Kruskal- Wallis test) para transpiración (escala masa)

- A nivel de árbol para todo el periodo de toma de datos
Variable dependiente = Vmedia (cm/día)

trat	N	Rango promedio
1,00	772	1326,36
10,00	579	1733,99
60,00	386	829,10
100,00	579	578,79
Total	2316	

Chi-cuadrado	1006,239
gl	3
Sig. asintót.	,000

Comparaciones múltiples (test de Tamhane)

Variable dependiente: v media (cm/d)
Tamhane

(I) trat_2	(J) trat_2	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1,00	10,00	-	.11190001640		-	-
		1,864580260456 259(*)	.06038087914 6833	,000	2,159710672 92828	1,569449847984 23
		1,098199172620 087(*)	,06038087914 6435	,000	,9390542890 6583	1,257344056174 35
10,00	1,00	1,864580260456 259(*)	.11190001640 6833	,000	1,569449847 98423	2,159710672928 28
		2,962779433076 346(*)	,10902817477 6831	,000	2,675146783 76930	3,250412082383 39
		3,328860583785 830(*)	,10500570999 7089	,000	3,051741676 92018	3,605979490651 48
60,00	1,00	1,098199172620 087(*)	.06038087914 6435	,000	1,257344056 17435	,9390542890658 3
		2,962779433076 346(*)	,10902817477 6831	,000	3,250412082 38339	2,675146783769 30
		,3660811507094 84(*)	,04637279403 5292	,000	,2437263430 0759	,4884359584113 8
100,00	1,00	1,464280323329 571(*)	,05277221620 6277	,000	1,603362564 05335	1,325198082605 80
		3,328860583785 830(*)	,10500570999 7089	,000	3,605979490 65148	3,051741676920 18
		,3660811507094 84(*)	,04637279403 5292	,000	,4884359584 1138	,2437263430075 9

* La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

Variable dependiente = Q (m3. día -1)

	trat	N	Rango promedi o
Q (m3.dia- 1)	10	579	1237,76
	60	579	840,03
	100	579	529,21
	Tota l	1737	

	Q (m3.dia-1)
Chi-cuadrado	580,619
gl	2
Sig. asintót.	,000

Comparaciones múltiples (test de Tamhane)

Variable dependiente: Q (m3.dia-1)
Tamhane

(I) trat	(J) trat	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite superior	Límite inferior
10	60	,015085371569600(*)	,000865186272480	,000	,01301389363333	,01715684950587
	100	,017390283602617(*)	,000862427191603	,000	,01532534130734	,01945522589790
60	10	-	,000865186272480	,000	-	-
	100	,002304912033017(*)	,000204976781329	,000	,00181476176764	,00279506229839
100	10	-	,000862427191603	,000	-	-
	60	,002304912033017(*)	,000204976781329	,000	,00279506229839	,00181476176764

* La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

- A nivel de árbol para el periodo estival: 22 junio-31 agosto 2009

	Rangos		
	trat	N	Rango promedio
Q (m3.dia-1)	10	213	522,47
	60	213	272,96
	100	213	164,57
	Total	639	

Estadísticos de contraste ^{a,b}	
Q (m3.dia-1)	
Chi-cuadrado	421,049
gl	2
Sig. asintót.	,000

Comparaciones múltiples						
(I) trat	(J) trat	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
10	60	,026605381037678*	,001667518810221	,000	,02259260200816	,03061816006719
	100	,028577157134839*	,001672037017891	,000	,02455384061568	,03260047365400
60	10	-,026605381037678*	,001667518810221	,000	-,03061816006719	-,02259260200816
	100	,001971776097161*	,000246725288397	,000	,00138018012474	,00256337206958
100	10	-,028577157134839*	,001672037017891	,000	-,03260047365400	-,02455384061568
	60	-,001971776097161*	,000246725288397	,000	-,00256337206958	-,00138018012474

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

- a nivel de árbol para el periodo no estival: 1 septiembre- 31 diciembre 2009

	trat	N	Rango promedio	Estadísticos de contraste^{a,b}	
Q (m3.dia-1)	10	366	722,44	Q (m3.dia-1)	
	60	366	563,82	Chi-cuadrado	237,228
	100	366	362,24	gl	2
	Total	1098		Sig. asintót.	,000

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Q (m3.dia-1)
Tamhane

(I) trat_2	(J) trat_2	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite superior	Límite inferior
10,00	60,00	,008381103764 408(*)	,000782208741 173	,000	,00650609907228	,010256108456 53
	100,00	,010879889989 603(*)	,000771272317 296	,000	,00903071679448	,012729063184 73
60,00	10,00	- ,008381103764 408(*)	,000782208741 173	,000	-,01025610845653	,006506099072 28
	100,00	,002498786225 195(*)	,000290746676 463	,000	,00180289801272	,003194674437 67
100,00	10,00	- ,010879889989 603(*)	,000771272317 296	,000	-,01272906318473	,009030716794 48
	60,00	- ,002498786225 195(*)	,000290746676 463	,000	-,00319467443767	,001802898012 72

* La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

- A nivel de masa para todo el periodo de toma de datos

Rangos					
	trat	N	Rango promedio		
mm clase	10	579	895,31	mm clase	
	60	579	917,68	Chi-cuadrado	19,991
	100	579	794,01	gl	2
	Total	1737		Sig. asintót.	,000

Comparaciones múltiples

mm clase		Tamhane				
		Intervalo de confianza al 95%				
(I) trat	(J) trat	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Límite inferior	Límite superior
10	60	,145823238759329*	,013555490243086	,000	,11338116316456	,17826531435410
	100	,177755249328083*	,013257156607585	,000	,14602111737848	,20948938127768
60	10	-,145823238759329*	,013555490243086	,000	-,17826531435410	-,11338116316456
	100	,031932010568755*	,005802716545608	,000	,01805540044553	,04580862069198
100	10	-,177755249328083*	,013257156607585	,000	-,20948938127768	-,14602111737848
	60	-,031932010568755*	,005802716545608	,000	-,04580862069198	-,01805540044553

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

- A nivel de masa para el periodo estival: 22 junio-31 agosto 2009

	trat	N	Rango promedio
mm clase	10	213	356,65
	60	213	327,00
	100	213	276,35
	Total	639	

Estadísticos de contraste ^{a,b}	
mm clase	
Chi-cuadrado	20,612
gl	2
Sig. asintót.	,000

Comparaciones múltiples

mm clase		Tamhane				
		Intervalo de confianza al 95%				
(I) trat	(J) trat	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Límite inferior	Límite superior
10	60	,186327418845460*	,023084520872016	,000	,13082876663659	,24182607105433
	100	,220215358831295*	,022577907328729	,000	,16590215669256	,27452856097003
60	10	-,186327418845460*	,023084520872016	,000	-,24182607105433	-,13082876663659
	100	,033887939985835*	,007415568754816	,000	,01609879607641	,05167708389526
100	10	-,220215358831295*	,022577907328729	,000	-,27452856097003	-,16590215669256
	60	-,033887939985835*	,007415568754816	,000	-,05167708389526	-,01609879607641

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

- A nivel de masa para el periodo no estival: 1 septiembre- 31 diciembre 2009

Rangos			
	trat	N	Rango promedio
mm clase	10	366	539,90
	60	366	593,09
	100	366	515,51

Estadísticos de contraste ^{a,b}	
	mm clase
Chi-cuadrado	11,457
gl	2
Sig. asintót.	,003

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Q (m3.dia-1)
Tamhane

(I) trat_2	(J) trat_2	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite superior	Limite inferior
10,00	60,00	,008381103764408(*)	,000782208741173	,000	,00650609907228	,01025610845653
	100,00	,010879889989603(*)	,000771272317296	,000	,00903071679448	,01272906318473
60,00	10,00	-,008381103764408(*)	,000782208741173	,000	-,01025610845653	-,00650609907228
	100,00	,002498786225195(*)	,000290746676463	,000	,00180289801272	,00319467443767
100,00	10,00	-,010879889989603(*)	,000771272317296	,000	-,01272906318473	-,00903071679448
	60,00	-,002498786225195(*)	,000290746676463	,000	-,00319467443767	-,00180289801272

* La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

D. Comparación de medias (Kruskal- Wallis test) para transpiración (escala árbol)

E.

- A nivel de árbol para todo el periodo de toma de datos (con variable Q)

Rangos

	trat	N	Rango promedio
Q (m3.dia-1)	10,0	579	545,81
	0		
	CF	772	773,64
	Total	1351	

	Q (m3.dia-1)
Chi-cuadrado	112,823
gl	1
Sig. asintót.	,000

- A nivel de árbol para todo el periodo de toma de datos (con variable V)

Rangos

	trat	N	Rango promedio
v media (cm/d)	10,	579	861,99
	CF	772	536,51
	Total	1351	

	v media (cm/d)
Chi-cuadrado	230,282
gl	1
Sig. asintót.	,000

E. comparación entre la humedad de suelo de los tratamientos (escala masa) según días seleccionados

- date = 01-JUN-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas(a)

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,668	2	13	,530

ANOVA(a)

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	1485,830	2	742,915	4,298	,037
Intra-grupos	2247,306	13	172,870		
Total	3733,136	15			

Comparaciones múltiples(a)

Variable dependiente: mm
HSD de Tukey

(I) trat	(J) trat	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig. Límite inferior
		Límite inferior	Límite superior	
10	60	20,507107774156500(*)	7,698675428963510	,048
	100	2,666405553544792	8,819940726030470	,951
60	10	-20,507107774156500(*)	7,698675428963510	,048
	100	-17,840702220611710	8,240939702724230	,115
100	10	-2,666405553544792	8,819940726030470	,951
	60	17,840702220611710	8,240939702724230	,115

* La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

- date = 05-AUG-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas(a)

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,665	2	17	,219

ANOVA(a)

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	538,759	2	269,379	1,343	,287
Intra-grupos	3409,106	17	200,536		
Total	3947,865	19			

- date = 05-OCT-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas(a)

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,921	2	14	,183

ANOVA(a)

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	463,924	2	231,962	1,853	,193
Intra-grupos	1752,719	14	125,194		
Total	2216,643	16			

F. Comparación entre la humedad de suelo de los sondas bajo “influencia de árbol” entre los tratamientos

- date = 01-JUN-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas ^a				
humedad				
Estadístico de				
Levene	gl1	gl2	Sig.	
,607	2	9	,566	
a. date = 01-JUN-2009				

ANOVA ^a					
humedad					
	Suma de	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	cuadrados				
Inter-grupos	,011	2	,006	3,066	,097
Intra-grupos	,017	9	,002		
Total	,028	11			
a. date = 01-JUN-2009					

- date = 05-AUG-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas ^a				
humedad				
Estadístico de				
Levene	gl1	gl2	Sig.	
,611	2	14	,557	

a. date = 05-AUG-2009

ANOVA ^a					
humedad					
	Suma de				
	cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	,001	2	,000	,174	,842
Intra-grupos	,027	14	,002		
Total	,028	16			

a. date = 05-AUG-2009

- date = 05-OCT-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas ^a				
humedad				
Estadístico de				
Levene	gl1	gl2	Sig.	
2,058	2	12	,170	

a. date = 05-OCT-2009

ANOVA ^a					
humedad					
	Suma de				
	cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	,003	2	,002	1,018	,390
Intra-grupos	,018	12	,002		
Total	,021	14			

a. date = 05-OCT-2009

G. Comparación de medias entre la humedad del suelo (escala árbol)

- dia = 01-JUN-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas ^a				
humedad				
Estadístico de				
Levene	gl1	gl2	Sig.	
,926	1	5	,380	

a. dia = 01-JUN-2009

ANOVA ^a					
humedad					
	Suma de				
	cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	,010	1	,010	4,163	,097
Intra-grupos	,012	5	,002		
Total	,022	6			

a. dia = 01-JUN-2009

- dia = 05-AUG-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas ^a				
humedad				
Estadístico de				
Levene	gl1	gl2	Sig.	
,737	1	7	,419	

a. dia = 05-AUG-2009

ANOVA ^a					
humedad					
	Suma de				
	cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	,010	1	,010	4,163	,097
Intra-grupos	,012	5	,002		
Total	,022	6			

a. dia = 01-JUN-2009

- dia = 05-OCT-2009

Prueba de homogeneidad de varianzas ^a				
humedad				
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.	
,737	1	7	,419	

a. dia = 05-OCT-2009

ANOVA ^a					
humedad					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	,000	1	,000	,197	,671
Intra-grupos	,014	7	,002		
Total	,014	8			

a. dia = 05-OCT-2009

H. Ejemplos de algunos resultados estadísticos de la modelación de la transpiración como función del DPV (escala masa)

- Tratamiento 10

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,924	,854	,853	,113

La variable independiente esVAR00006.

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	9,231	1	9,231	720,615	,000
Residual	1,576	123	,013		
Total	10,806	124			

La variable independiente esVAR00006.

Coeficientes					
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
ln(VAR00006)	,296	,011	,924	26,844	,000
(Constante)	,693	,014		50,139	,000

- Tratamiento 60

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,849	,720	,716	,138

La variable independiente esVAR00013.

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	3,458	1	3,458	182,707	,000
Residual	1,344	71	,019		
Total	4,802	72			

La variable independiente esVAR00013.

Coefficientes					
	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
ln(VAR00013)	,287	,021	,849	13,517	,000
(Constante)	,771	,033		23,530	,000

- Tratamiento 100

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,834	,696	,691	,135

La variable independiente esVAR00016.

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	2,794	1	2,794	153,194	,000
Residual	1,222	67	,018		
Total	4,016	68			

La variable independiente esVAR00016.

Coeficientes					
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error típico	Beta	t	Sig.
ln(VAR00016)	,284	,023	,834	12,377	,000
(Constante)	,673	,033		20,117	,000