

Cubiertas forestales y respuesta microclimática

V. Gómez Sanz*

Departamento de Silvopascicultura. EUIT Forestal. Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid. España

Resumen

El microclima generado bajo las cubiertas vegetales juega un papel especialmente trascendente en el desarrollo y perpetuación de las mismas, consecuencia de la entramada red de interacciones e interdependencias que entre ambos elementos se establecen. En el caso concreto de las cubiertas de índole forestal, las intervenciones selvícolas modifican la situación de equilibrio microclima-dosel previamente establecida, por lo que el conocimiento de la respuesta microclimática inducida es de especial interés para evitar la aparición de riesgos no deseados que afecten a la masa intervenida o comprometan los resultados buscados con la actuación. El trabajo que se presenta recoge una revisión y puesta en común de los aspectos más relevantes del ámbito microclimático derivado de la presencia de cubiertas vegetales de carácter forestal, haciendo especial hincapié en los materiales y métodos manejados para su evaluación y estudio. Este estado actual del conocimiento sobre el tema puede posibilitar la definición de nuevas líneas de investigación que giren en torno a la evaluación del papel de la respuesta microclimática en el comportamiento ecológico de distintas tipologías de estación forestal.

Palabras clave: microclima forestal.

Abstract

Forest covers and microclimate response

Microclimate generated under forest covers plays an especially significant role in their development and regeneration, a result of the complex network of relationships that it establishes between both elements. In the specific case of forest covers, forestry modifies previous microclimate-canopy balance, so that knowledge on the induced microclimate response is of great interest to avoid apparition of undersirable risks that disturb the threatened stand or compromise the searched aims. This work gathers a checking and joint presentation of the most important aspects related to microclimate, stemed from the forest covers presence, emphasizing the materials and methods used for their evaluation and studio. This present state about knowledge related to this subject can make possible the definition of new lines of research, aimed at the role of microclimate response evaluation in the ecological behaviour over different types of forest sites.

Key words: forest microclimate.

Introducción

La atmósfera próxima a la interfase tierra-aire resulta ser, a nivel planetario, el espacio más activo físicamente, consecuencia del contacto directo de un fluido (aire atmosférico) con una superficie sólida (superficie terrestre), donde los estímulos físicos son, a su vez, modificados por factores biológicos, al configurar el principal medio en el que se asienta la vida.

En este ámbito, la elevada complejidad que deriva de los fuertes vínculos que los dispares componentes del sistema atmósfera-superficie terrestre establecen y mantienen entre sí, se articula a lo largo de una amplia

gama temporal y espacial de procesos, eminentemente bio-físicos, que recogen los variados intercambios de energía, materia y momento, las transformaciones a ellos asociadas y los mecanismos de realimentación en la interfase tierra-aire, discurriendo desde la pequeña dimensión, ocurren cada día en un ámbito local, hasta aquéllos que abarcan todo el planeta y duran un buen número de años (Cuadrat y Pita, 1997).

Toda esta diversidad espacial y temporal conduce, inevitablemente, a utilizar diferentes escalas de aproximación en el conocimiento científico de la estructura y función del sistema atmósfera-superficie terrestre. De esta forma, las especiales características que adquieren el aire atmosférico y la parte superficial de la corteza terrestre, incluyendo el medio sub-superficial (o suelo), bajo condiciones muy restringi-

* Autor para la correspondencia: vgomez@forestales.upm.es
Recibido: 02-07-03; Aceptado: 28-10-03.

das, o lo que es lo mismo, en una esfera temporal y espacial reducida, delimitan el ámbito microclimático. En este contexto, el microclima puede ser definido como las particulares condiciones microescálicas de estado y comportamiento del sistema atmósfera-superficie terrestre.

Es fácil comprender que el microclima juega un papel ecológico muy destacado, siendo el conductor primario de las respuestas biológicas a la necesidad de relación con el medio físico (atributo de función) que caracteriza a cualquier ser vivo. Consecuentemente, las variadas condiciones micrometeorológicas que a lo largo de los sistemas naturales aparecen resultan ineludibles para comprender y predecir procesos tales como fotosíntesis, regeneración, crecimiento, ciclo de nutrientes y degradación de la materia orgánica (Chen *et al.*, 1999).

De entre los distintos sistemas naturales que se localizan a escala planetaria, son sin duda los sistemas forestales aquéllos que muestran una respuesta microclimática más específica, aspecto que juega un papel enormemente destacado en el mantenimiento de la diversidad ecológica de los ecosistemas terrestres. Las condiciones microclimáticas dentro y bajo una cubierta vegetal de índole forestal tienden a diferir respecto de aquéllas sobre o fuera de ella, definiendo un ambiente forestal, *ecoclima* en palabras de Gandullo (1994), caracterizado por las modificaciones que sufren las variables de estado del sistema aire-suelo (luz, temperatura del aire y del suelo, velocidad del viento, humedad atmosférica, etc.) respecto a las condiciones climáticas generales. Puede entenderse entonces como microclima forestal el conjunto de las especiales condiciones de estado y comportamiento medio o normal que bajo las cubiertas forestales adquieren tanto el suelo como el aire próximo a él, a escalas temporales y espaciales reducidas, claramente desacorde con aquel que se presenta en otros sistemas terrestres colindantes.

La indudable trascendencia de las diferentes situaciones microclimáticas en la estructura y funcionamiento de los sistemas naturales en general, y forestales en particular, ha puesto al microclima dentro de aquellos elementos del medio bio-físico objeto de estudio con método científico. Las peculiaridades involucradas en su estudio y evaluación han llevado a un desarrollo sensiblemente inferior al acontecido en otras disciplinas más o menos próximas, si bien la evolución del conocimiento específico en el ámbito microclimático ha experimentado un impulso patente a lo largo de las últimas décadas, gracias a trabajos de au-

tores como Sutton (1953), Geiger (1965), Monteith (1975), Lee (1978), Stoutjesdijk y Barkman (1992) o Arya (2001).

Junto a este grupo de trabajos monográficos, diferentes aspectos de índole microclimática aparecen con frecuencia en textos variados, especialmente en aquéllos relacionados con la climatología —Jansá (1969), Cuadrat y Pita (1997), Barry y Chorley (1999) o Fuentes Yagüe (2000)—, o con la ecología y la fisiología vegetal —Pesson (1978), Lemée (1978), Forman (1995), Kimmins (1997), Barnes *et al.* (1998), Smith y Smith (2001) o Terradas (2001)—. En ellos se recogen los resultados de un buen número de trabajos de investigación, si bien, la información microclimática y micrometeorológica aparece de forma dispersa y en un papel claramente secundario.

Situación análoga se presenta en los artículos publicados en revistas especializadas, en las que los trabajos específicos relacionados con el microclima forestal son particularmente escasos (prácticamente inexistentes en el ámbito español) y dispersos, hallándose de forma más o menos colateral en otras obras que con diferentes objetivos se centran en el estudio de los sistemas naturales: al evaluar los distintos ciclos de materia y energía que caracterizan los sistemas forestales (Escudero *et al.*, 1993; García del Barrio, 2000), al describir la respuesta fisiológica de las especies forestales a ciertas condiciones ambientales (Gil *et al.*, 1999) o al valorar los factores condicionantes de la regeneración de ciertas masas forestales (Campo y Peña, 1922; Díaz-Maroto *et al.*, 1994; Caldentey *et al.*, 2001; Galiana *et al.*, 2001).

Dentro de esta patente escasez, resultan destacables los trabajos dirigidos por el Dr. Gandullo, por considerarse que probablemente sean los que se aproximan en mayor medida, desde una óptica aplicada, inherente a su quehacer como investigador, al estudio de lo propiamente microclimático, estando orientados hacia la valoración de las condiciones de la estación en el aprovechamiento energético de la radiación solar (Gandullo, 1974 y 1997) y a la evaluación de las condiciones ecológicas de desarrollo de ciertas formaciones vegetales de carácter forestal. Este es el caso de la *laurisilva* canaria (Gandullo *et al.*, 1991) o de las masas de *pino silvestre* y *rebollo* en los Montes de Valsaín —Segovia— (Gómez Sanz, 2002), donde se acometió una caracterización sistemática del ambiente microclimático desarrollado bajo su cubierta y búsqueda de relaciones con las variables delimitadoras de las condiciones de estación.

Lo que a continuación se expone pretende contribuir a una mejor comprensión de la respuesta microclimática asociada a la presencia de cubiertas vegetales de índole forestal. Para ello: (1) se desarrolla una revisión y puesta en común de los aspectos más sobresalientes que permiten caracterizar las complejas relaciones que entre ambos elementos se establecen, y (2) se hace una valoración de las líneas de investigación seguidas hasta la fecha en los estudios al respecto, prestando especial atención a los materiales y métodos empleados y a las limitaciones más patentes observadas. Todo ello con un propósito final, facilitar el punto de partida a nuevos investigadores interesados en desarrollar futuras líneas de investigación en el ámbito de la microclimatología forestal.

Papel de los doseles vegetales en el balance energético local

De los variados elementos que componen espacialmente los sistemas naturales no acuáticos, el que, sin duda, tiene mayor trascendencia a nivel micrometeorológico y microclimático es el configurado por las distintas estructuras aéreas de los individuos que participan en las diferentes fitocenosis que pueblan dichos sistemas.

Para una localización determinada, el entramado que supone la disposición espacial de los órganos aéreos de los vegetales superiores constituye lo que se conoce como cubierta o dosel vegetal. Estas organizaciones espaciales de componentes biológicos (hojas, ramas, ramillas y troncos) son estructuras verticalmente complejas y horizontalmente heterogéneas que actúan como:

— La principal superficie absorbente y emisora en los sistemas naturales donde se encuentran presentes, convirtiéndose en un sistema fuente dual de intercambio de masa y energía entre la biosfera y la atmósfera (Baldocchi *et al.*, 2000), al que contribuye, junto a los sistemas aéreos vegetales, la superficie del suelo presente bajo ellos.

— Una «manta» o segundo suelo en altura especialmente poroso, quedando entre su nivel superior y el verdadero suelo un espacio suficientemente aireado en el que se modifica la forma e intensidad con la que actúan ciertos factores medioambientales.

No debe esperarse entonces que los intercambios de masa y energía, tanto a nivel de los sistemas aéreos vegetales como sobre el suelo que se sitúa bajo la vege-

tación, se comporten de igual forma a como se desarrollan sobre los desnudos o carentes de cubierta vegetal efectiva. El carácter «permeable y profundo» que deriva de la organización espacial de sus componentes genera, bajo las cubiertas vegetales, un ambiente microclimático específico y altamente variable.

Toda esta respuesta microclimática a la presencia de cubiertas vegetales viene dirigida por la acción simultánea y recíproca, en muchos casos, de un buen número de factores. Al nivel de los doseles vegetales, las transferencias de masa y energía están influenciadas por su composición específica (condicionante del carácter perenne o caduco y de las propiedades ópticas de las hojas), la arquitectura de los mismos (determinante de los atributos de permeabilidad y porosidad), el momento temporal considerado (que fija el flujo entrante de energía radiante) y la posición dentro de la cubierta (que define el grado de transición respecto a localizaciones vecinas carentes de vegetación o con cubierta vegetal netamente desigual —aperturas o bordes forestales—).

Un análisis más en detalle del efecto de la presencia de dosel vegetal sobre el comportamiento microclimático de una localización puede enfocarse a través del examen de su incidencia sobre los dos elementos básicos del Balance Energético Local (BEL).

Efecto sobre el Balance Neto de Radiación (BNR) —intercambios de energía radiante—

Dado que cualquier cuerpo opaco que se sitúa en el camino de los flujos de radiación proyecta una «sombra» que modifica drásticamente la energía radiante recibida en el área ensombrecida, el principal efecto en el BEL de la presencia de cubiertas vegetales es la introducción de una mayor complejidad en los patrones de comportamiento del BNR, o Radiación Neta (R_n), circunstancia que tiene repercusiones meteorológicas a escalas muy pequeñas, es decir, micrometeorológicas.

Esta intercepción de la radiación trae asociada la modificación de procesos básicos relacionados con la circulación de la energía radiante (figura 1):

a) La radiación incidente se distribuye a lo largo de la profundidad del dosel y la suma de los albedos de cada una de las hojas que forman la cubierta vegetal es menor que el de la cubierta completa, dado que los flujos reflejados son parcialmente absorbidos por las hojas adyacentes. Para Galoux (1981), si el dosel

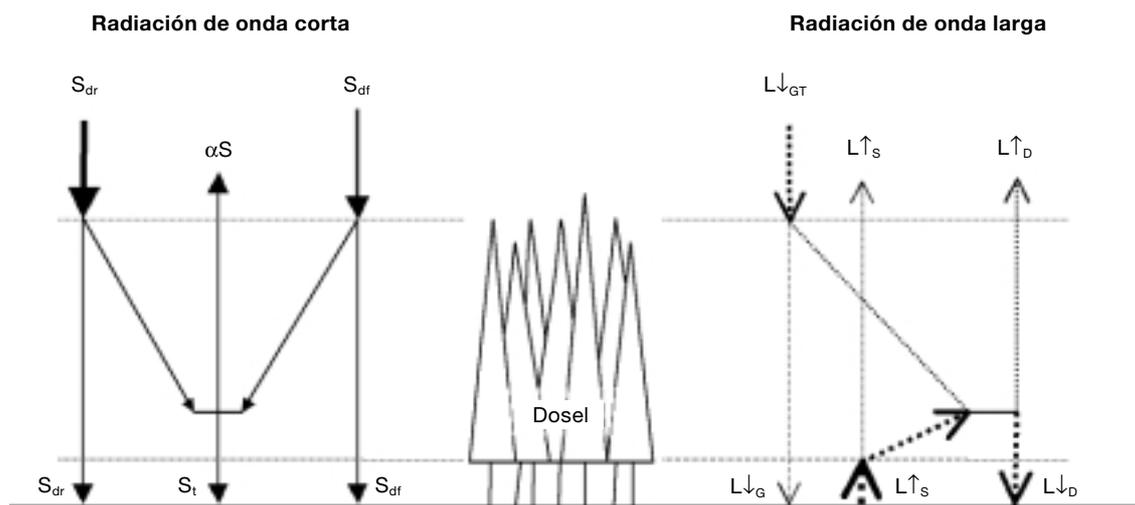


Figura 1. Cambios en los flujos de radiación que provoca la presencia de dosel vegetal. S_{dr} : radiación solar directa. S_{df} : radiación solar difusa. αS : albedo. S_t : radiación transmitida. $L_{\downarrow GT}$: radiación de onda larga emitida por el aire troposférico (contrairradiación). $L_{\uparrow S}$: radiación de onda larga emitida por el suelo (irradiación). $L_{\downarrow D}$: radiación de onda larga emitida por el dosel hacia el suelo. $L_{\uparrow D}$: radiación de onda larga emitida por el dosel hacia el exterior de la cubierta.

vegetal es completo y cerrado, el volumen de hojas es el factor más importante en la fase de crecimiento dado que la superficie de intercepción creada es en torno a 8-10 veces mayor que el total de la superficie de troncos y ramas. Este hecho explica el notoriamente bajo albedo de las cubiertas forestales (en especial las arbóreas), situándose entre las superficies presentes sobre la Tierra más eficientes en absorber radiación (Kimmins, 1997). Así mismo, en contraste con el suelo, el albedo de las cubiertas vegetales cerradas se presenta relativamente constante, dependiendo de su tipo y estructura (Evelt, 2000), adquiriendo los valores más bajos al mediodía, cuando la absorción es mayor, puesto que la luz solar penetra más profundamente dentro del dosel y es atrapada por múltiples reflexiones.

b) De forma derivada, la absorción de radiación provoca un cambio en la energía interna de los diferentes elementos que componen las cubiertas vegetales y del suelo que las sustenta, por lo que estos elementos incrementan sus emisiones de radiación, en este caso de onda larga. Los flujos de radiación provenientes del dosel vegetal se intensifican, mientras que el flujo de radiación del suelo se ve, en general, disminuido debido al descenso de la energía absorbida, consecuencia del ensombreamiento derivado de la presencia de la cubierta vegetal.

Todos estos cambios en los distintos procesos relacionados con los flujos de radiación (absorción, reflexión, transmisión y emisión), resultado de la naturaleza y atributos de porosidad y profundidad que los

doseles vegetales presentan, traen como consecuencias más relevantes:

1. La extinción o ensombreamiento de la radiación solar incidente. Las cubiertas vegetales actúan como estructuras que evitan la insolación directa del suelo, dando lugar a un ensombreamiento espacialmente heterogéneo del mismo, que pierde su efectividad, sobre todo, en las aperturas y bordes de la misma, siendo en éste último caso además marcadamente dependiente de su orientación. Bajo los doseles, gran parte de la radiación circulante queda detenida y absorbida al nivel de las copas, por lo que el espacio interior recibe radiación tanto de onda corta (por reflexión y transmisión), como de onda larga que proviene de la emitida por el dosel vegetal, modificando el balance neto de radiación.

2. La disminución en la amplitud de variación temporal (tanto anual como diaria) de la R_n bajo la cubierta, con superávit y déficit energéticos menos acusados. Durante los períodos de superávit energéticos, las entradas de radiación son menores, como consecuencia del ensombreamiento, mientras que en los períodos de déficit, las salidas se reducen al verse atrapadas por los elementos de la cubierta.

3. La modificación espectral de los flujos de radiación circulantes. Los pigmentos responsables de la fotosíntesis absorben radiación más eficientemente con longitud de onda situada en el azul-violeta y rojo-naranja, permitiendo que la reflexión y transmisión del verde exceda a la de otras longitudes de onda visibles (Kimmins, 1997).

Como se comentó anteriormente, la reflexión se ve, en general, disminuida. Para Packham *et al.* (1992) sólo entre un 6 y un 16% de la radiación visible, sobre todo verde —0,5 μm — y algo de naranja y rojo —0,6 a 0,75 μm —, es reflejada, si bien en el caso de la infrarroja —0,75-1 μm — estas cifras se sitúan en torno a un 70%. Al ser más reflejadas las radiaciones de onda larga, se aprecia un ligero cambio hacia longitudes de onda más rojas en los flujos de radiación que circulan en el interior de la cubierta (Forman, 1995).

A su vez, la dispersión de la radiación solar se ve complicada por la transmisividad del sistema. Las hojas de una cubierta transmiten del 10 al 25% de la radiación visible que reciben, si bien los coeficientes de transmisividad de radiación de onda corta de las hojas varían con las especies, desde virtualmente 0 para algunas coníferas a 0,25 o más para frondosas de hoja ancha, dentro de las especies arbóreas (Lee, 1978). Mientras que las especies de hoja perenne, por lo general coníferas de acículas opacas que actúan como un filtro neutral, reducen todas las longitudes de onda por igual, las especies de hoja caduca suelen presentar hojas translúcidas que provocan un cambio en la relación entre las longitudes de onda del rojo y del rojo lejano (valor zeta), valor que se sabe tiene un significado efecto sobre la fisiología de las plantas (Kimmins, 1997).

Efectos sobre el reparto energético (intercambios no radiantes)

No sólo el BNR se ve afectado por la presencia de cubierta vegetal, sino que también el reparto energético a él asociado se ve alterado. En este sentido, pueden considerarse como principales efectos:

1. La deflexión mecánica del viento (efecto pasivo). La masa de aire encerrada dentro del bosque queda desvinculada de la circulación general del aire, mientras que las corrientes generales se ven obligadas a sobrevolar el dosel o a esquivarlo horizontalmente (Jansá, 1969). Esta modificación del nivel de ventilación, que depende de la porosidad y profundidad de la cubierta (superficie foliar por unidad de volumen de cubierta), se traduce tanto en cambios en los flujos de calor latente, por modificación de la resistencia a la difusión dentro de la capa límite laminar (Léeme, 1978), como en modificaciones en los flujos de calor sensible, sobre todo, los convectivos. Una cubierta herbácea mantiene una masa de aire casi inmóvil entre sus hojas que aísla al suelo de los flujos de calor aprecia-

bles; en una formación arbórea la columna de aire entre el suelo y el dosel vegetal es mayor, por lo que la convección puede darse con una mayor facilidad (Payne y Gregory, 1992).

2. La creación de un juego de ensombraamientos-manchas de luz que ocasiona un complejo patrón superficial y temporal de áreas fuentes y sumideros de energía, circunstancia que incide de forma muy acusada sobre los flujos de calor sensible y de calor al suelo. La elevadísima variabilidad temporal y espacial de este proceso ha hecho muy compleja su evaluación, por lo que se sabe poco sobre la magnitud de este efecto o como varía temporalmente.

3. El aumento sensible de la humedad atmosférica, consecuencia de la continua transpiración de los organismos vegetales, por lo que los flujos de calor latente se ven afectados.

4. La disminución de los flujos de calor en el suelo debido, junto al efecto derivado del ensombreado de la cubierta, a la presencia variable en los horizontes superficiales del suelo de materiales de naturaleza orgánica, tanto vivos (raíces y raicillas) como muertos, más o menos transformados (humus y materia orgánica fresca), que son deficientes conductores del calor.

La capa superficial de despojos orgánicos en descomposición, especialmente abundante en determinadas formaciones boscosas, supone un efectivo aislante energético que dificulta tanto la entrada como la salida de energía hacia o desde el suelo mineral más profundo, modifica su albedo y afecta a la difusión del calor y de la humedad (tiene mayor albedo, menos conductividad térmica y más cantidad de poros que el resto del suelo).

5. El incremento de los flujos metabólicos, tanto de asimilación (fotosíntesis) como de consumo (respiración), consecuencia de la presencia diversa de los organismos vivos que integran los sistemas naturales.

No obstante, llegado a este punto, donde han sido expuestas las principales afecciones sobre el BEL que particularizan la respuesta microclimática inducida por los doseles vegetales en general, y forestales en particular, se hace necesario señalar que las relaciones microclimática y cubierta forestal no son exclusivamente unidireccionales, sino que constituyen un sistema interactivo y retroactivo (Aussenac, 2000), de tal forma que cualquier alteración en alguno de sus componentes deriva en un reajuste de los otros. Bajo la cubierta forestal, el devenir de la energía y la materia, base de la respuesta microclimática, está fuertemente ligado a la naturaleza y

organización espacial del material vivo que constituye el dosel vegetal, mientras que, recíprocamente, la organización de las estructuras aéreas de las cubiertas vegetales depende de las condiciones microclimáticas generadas. Existe así un estado de equilibrio entre la distribución vertical del microclima y las características anatómicas y morfológicas de la cubierta, que depende a su vez de las potencialidades de las especies, de la estructura espacial de la masa y de las características del clima general (Ross, 1975; Aussenac y Ducrey, 1977a).

Modificaciones bajo cubiertas forestales cerradas de las variables de estado microclimáticas

En aquellas masas forestales de espesura completa, con el dosel relativamente bien cerrado y homogéneo, las variables de estado que permiten caracterizar los diferentes elementos del clima experimentan modificaciones apreciables respecto a las localizaciones próximas a ellas carentes de cubierta vegetal efectiva. Obviamente, la extensión de los cambios variará, principalmente de acuerdo con la densidad y el tipo (composición específica y estructura) de la cubierta en cuestión, las características de la estación (fisiografía local) y las condiciones climáticas generales (Pardé, 1978; Tivi y O'hare, 1981; Chen *et al.*, 1993; Aussenac, 2000).

Está actualmente asumido que las modificaciones micrometeorológicas generadas se manifiestan, básicamente, en una reducción de los valores extremos de las variables de estado —amortiguamiento o suavización de las condiciones climáticas generales— tanto del aire como del suelo, circunstancia que, como apun-

ta Gandullo (1994), puede resultar vital para la instalación efectiva y el desarrollo de las especies que de forma natural integran las fitocenosis forestales.

No obstante, este comportamiento general, microclimático, presenta matizaciones interesantes que afectan a cada una de las variables de estado consideradas, dado que no todas responden en igual medida a la presencia de cubierta vegetal (figura 2).

Modificación de la Luminosidad

El efecto de un bosque sobre la intercepción de la luz solar resulta bastante obvio. El flujo entrante de radiación solar se ve modificado por la presencia de cubierta vegetal forestal cerrada, circunstancia fácilmente apreciable por los cambios en cantidad y calidad de la luz que llega al suelo bajo la misma. Dada la intercepción que los sistemas aéreos de los vegetales provocan, el microclima del bosque es globalmente menos luminoso, si bien esta extinción de la luminosidad bajo la cubierta forestal no resulta uniforme, ni cuantitativa ni cualitativamente.

El flujo de radiación solar entrante en un día despejado es generalmente muy variable, dado que la cubierta no proporciona una sombra continua y uniforme al suelo. La única luz directa que alcanza el suelo forestal lo hace en forma de manchas de luz, producidas cuando los rayos solares pasan a través de los huecos que deja la cubierta de hojas (según el día va progresando baten ciertas áreas con intensidades de luz muy dispares, siendo en algunos casos muy próximas a las de sitios abiertos). Los lugares bajo las partes más densas de la cubierta sólo reciben débil luz difusa y transmitida, posiblemente inferior a un 2% de la reci-

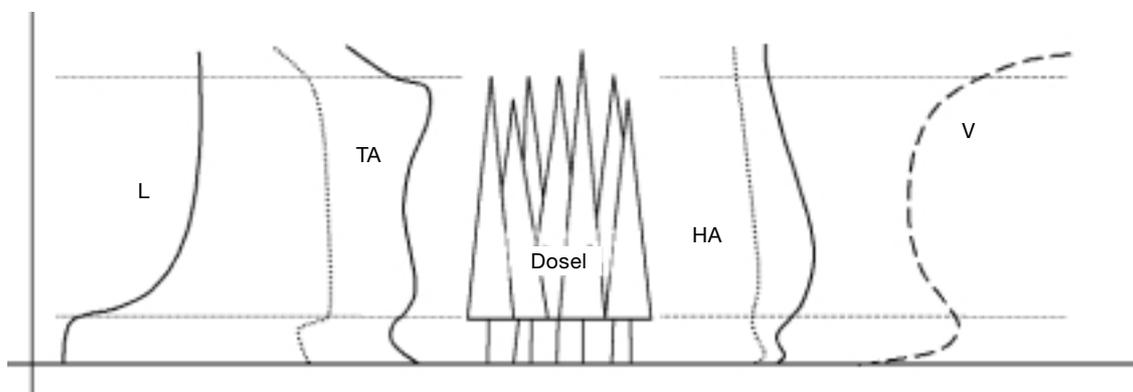


Figura 2. Perfiles verticales de variación de las variables de estado. TA: temperatura del aire. HA: humedad atmosférica. V: velocidad del viento. L: luminosidad: trazo continuo, día; trazo discontinuo en puntos, noche; trazo discontinuo en líneas, día y noche.

bida en suelos descubiertos (Burrows, 1990), mientras que los huecos grandes de la misma permiten que el suelo bajo ellos pueda estar iluminado buena parte del día. Bajo los pequeños huecos que deja el dosel, las manchas de luz alcanzan el suelo brevemente, al cambiar continuamente de acuerdo con el movimiento relativo del Sol y las condiciones del viento (Packham *et al.*, 1992). Este patrón de comportamiento se difumina en días cubiertos de nubosidad, cuando la mayor parte de la luz, tanto incidente sobre la cubierta forestal como circulante en su interior, es de carácter difuso, lo que provoca unas condiciones más homogéneas de iluminación.

Bajo el dosel vegetal, en los pisos vegetales inferiores o a nivel del suelo, la luz presente responde, por tanto, a las manchas de luz y a la radiación difusa filtrada a través de la cubierta. Las manchas de luz son cualitativamente similares a la luz en la cima de la cubierta forestal, mientras que la luz de sombra se caracteriza por ser más reducida en radiación fotosintética activa. Así, la composición espectral resulta ser muy baja en la banda del espectro responsable de la fotosíntesis, algo más alta en verde $-0,55 \mu-$ y más elevada en rojo lejano $-0,75 \mu-$, lo que se traduce en una baja relación rojo-rojo lejano -valor zeta- (Burrows, 1990; Packham *et al.*, 1992; Barnes *et al.*, 1998; Aussenac, 2000). Esta tendencia general se ve reforzada o difuminada en función del tipo de cubierta vegetal; bajo cubierta de coníferas las modificaciones son poco importantes, mientras que según se pasa hacia las frondosas caducifolias se observa una paulatina reducción de las longitudes rojas y azules, empleadas preferentemente para la función clorofílica, lo que explicaría, por ejemplo, la luminosidad verde-amarillenta que se aprecia bajo hayedos (Gandullo, 1994; Aussenac, 2000).

La distribución de la luz dentro y bajo la cubierta resulta estar directamente relacionada con la llegada potencial de radiación solar (cuyo comportamiento depende del momento temporal considerado, de la posición del lugar respecto del total de la superficie terrestre —latitud— y de la organización espacial de la misma —fisiografía—) y con las condiciones de masa vegetal (composición y arquitectura del dosel), en las que el carácter perenne o no de las hojas que constituyen la cubierta forestal juega un papel especialmente destacado.

En los bosques cerrados de coníferas, la extinción de la radiación solar es más alta y uniforme, dado el carácter perenne de las hojas y la mayor uniformidad en

la coloración del follaje a lo largo del año (Galoux, 1981). La sombra provocada por la cubierta es prácticamente la misma en su patrón temporal, con totales mensuales de luz que muestran una tendencia estacional simétrica, similar a la de localizaciones desnudas.

La situación es netamente diferente en bosques de hoja caduca, en los que es posible reconocer dos fases: fase de luz, en la cual los árboles están desnudos de hojas, y fase de sombra, cuando la cubierta de hojas es efectiva (Packham *et al.*, 1992). Así:

— Durante la fase de luz, la composición espectral dentro y fuera del bosque es muy similar, si bien la sombra de troncos y ramas reduce la cantidad de luz difusa recibida por el suelo entre 1/4 y 1/3 respecto de un sitio sin cubierta vegetal. Para las latitudes medias en el Hemisferio Norte, la radiación solar directa raramente penetra en diciembre hasta el suelo, excepto en grandes claros, mientras que en abril esa cantidad es similar a la de la radiación difusa. El incremento proporcional de la luz total desde el mínimo invernal hasta abril es mayor dentro del bosque que fuera de él (Lee, 1978).

— La luz en las diferentes partes del bosque es mucho más variable en la fase de sombra, resultado de la intercepción heterogénea del dosel, siendo ampliamente verde como consecuencia de la transmisión a través del follaje.

En cualquier caso, únicamente una porción, más o menos pequeña, de la luz solar incidente alcanza el suelo bajo una cubierta forestal densa, por lo que la extinción de la luz provocada por la presencia de cubiertas vegetales suele expresarse a través del concepto de *Iluminación Relativa* (IR) o porcentaje respecto de la iluminación solar total que alcanza la superficie bajo dosel vegetal. La fracción relativa de luz no interceptada que alcanza el suelo decrece exponencialmente con el incremento de la densidad del dosel, que puede ser evaluado a través del Índice de Área Foliar (LAI). Monsi y Saeki (1953) fueron los primeros en aplicar la Ley de Lambert-Beer a la extinción de la radiación en comunidades «monocapa» (la variación de la radiación global según penetra en una cubierta vegetal puede expresarse con una ecuación exponencial negativa):

$$I_z = I_0 \cdot e^{-bx}$$

donde I_z es la radiación solar recibida por un plano horizontal a una altura z en el interior de una cubierta vegetal, I_0 es la radiación solar recibida por la superficie de la cubierta, eliminada la fracción reflejada por ésta, b es el coeficiente de extinción y x es la distancia

a través del medio con turbidez constante o el índice de área foliar entre los niveles 0 y z (LAI). Esta ley es estrictamente válida para la radiación monocromática con rayos paralelos (Lee, 1978; Pardé, 1978; Lamée, 1978, Galoux, 1981; Baldocchi *et al.*, 2000).

En esta expresión, el coeficiente de extinción depende de la arquitectura del follaje y de sus propiedades ópticas, mientras que el LAI varía dentro de valores muy amplios según las especies que componen la cubierta y según las estaciones del año (Lemée, 1978).

La facilidad de evaluación de la extinción de la luminosidad por comparación con localizaciones descubiertas próximas ha hecho que sea relativamente fácil encontrar trabajos que han determinado los diferentes coeficientes de extinción para distintos tipos de bosque (Geiger, 1965; Pardé, 1978; Kimmins, 1997), habiendo sido también numerosos los modelos desarrollados con el fin de conocer la IR asociada a distintas cubiertas vegetales.

Así mismo, la repercusión que las modificaciones en la incidencia de la luz tienen en la regeneración y crecimiento de las masas forestales ha sido abordada en trabajos como los de Campo y Peña (1922), Roussel (1972) ó Rojo Saiz (1977). Sin embargo, ninguno de estos trabajos traduce los valores de extinción en términos de espesura, por la gran dificultad que entraña. El problema, aún hoy sin resolver, es saber qué espesuras son necesarias para alcanzar ciertas cifras de iluminación dentro de las masas (Rojo y Montero, 1996).

Finalmente, entre las aportaciones más recientes está el desarrollo de modelos informatizados de caracterización del comportamiento de la radiación solar incidente, herramientas que manejan habitualmente parámetros como total LAI, distribución vertical del LAI, radiación incidente y elevación del Sol, ángulo medio y coeficiente de transmisión de las hojas. Resultan de interés en este ámbito la propuesta de De Castro y Fetcher (1998), con un modelo que simula la intercepción tridimensional de la luz bajo cubierta mixta de tres especies forestales, o la de Rapp *et al.* (2001), que aporta un modelo digital de radiación solar de aplicación en medios forestales.

Modificación de la Temperatura del Aire

El comportamiento temporal y espacial de la temperatura del aire bajo cubiertas forestales cerradas es extraordinariamente complejo debido básicamente a que responde a la interacción entre:

— La entramada red de flujos de radiación interdependientes que se establece entre los sistemas aéreos que constituyen la cubierta vegetal y el suelo. Dentro de estos flujos, la extinción no uniforme por el dosel vegetal de la radiación solar incidente es la principal responsable de la creación de un complejo abanico de áreas fuente y sumidero de energía, con trascendencia en el estado energético y comportamiento dinámico del aire.

— El comportamiento turbulento del aire, lo que lleva a que los flujos de calor sensible y latente dentro del aire retenido en la cubierta se desarrollen con recorridos e intensidades muy variables.

Estas peculiaridades en el BEL hacen que resulte especialmente difícil establecer perfiles térmicos o patrones espaciales de variación dentro de las cubiertas vegetales, así como que aparezcan diferencias significativas entre las temperaturas del aire bajo cubierta y las de localizaciones vecinas descubiertas de vegetación.

En este último aspecto, es posible afirmar que las cubiertas forestales amortiguan las diferencias de temperaturas diarias y estacionales del aire comparado con el suelo desnudo de vegetación. La situación más frecuente, por tanto, resulta ser que bajo la cubierta forestal los máximos diarios y anuales de la temperatura del aire sean más bajos que las áreas exteriores próximas y que las mínimas correspondientes sean más altas, reduciéndose el riesgo de heladas. Las últimas aproximaciones, como la de Morecroft *et al.* (1998), establecen que estas diferencias guardan correlación significativa con la radiación solar incidente, la presencia o ausencia de hojas en la cubierta y la velocidad y comportamiento del viento, factores que inducen una fuerte variabilidad tanto temporal como espacial.

Durante el día, la radiación entrante es interceptada por el follaje y una capa de aire cálido se desarrolla en el espacio de la cubierta. El calor sensible diverge desde la región fuente (usualmente el nivel de máxima densidad foliar, donde es absorbida la mayor cantidad de radiación solar) y la mezcla turbulenta puede extender esta capa hacia el suelo o por encima de la cubierta, si bien el espacio entre los troncos permanece siempre más frío. La temperatura presenta consecuentemente dos máximos: (1) en la parte superior de las copas al inicio del mediodía; (2) en la parte superior de los troncos, sobre todo en agosto, de menor intensidad (Raynor, 1971; Aussenac y Ducrey, 1977a). Esta inversión de temperatura es una respuesta micro-

climática típica de la presencia de cubiertas forestales (Arya, 2001).

El dosel llega a ser la principal fuente de radiación a lo largo de la noche y las temperaturas allí alcanzan valores comparables con aquéllas obtenidas cerca del suelo en localizaciones abiertas. El espacio bajo la cubierta se enfría por subsidencia del aire frío procedente del dosel hasta un espacio isotérmico, de tal forma que, en algunas ocasiones, las temperaturas mínimas no aparecen al nivel del suelo, sino justo debajo de la corona de copas. A pesar de ello, el reducido factor de cielo visible y la radiación de onda larga atrapada en la parte baja de la cubierta hacen que las temperaturas se mantengan templadas en este espacio, en comparación con localizaciones carentes de cubierta vegetal (Raynor, 1971; Arya, 2001).

Horizontalmente, las diferencias térmicas entre localizaciones son más patentes justo antes de la puesta del Sol y después de su salida —para Geiger (1965), el acusado descenso e incremento en el calentamiento solar que sigue a estos momentos del día difuminan e invalidan los contrastes locales que se desarrollan durante el día y la noche—, en la estación cálida (mayor entrada de radiación) y especialmente bajo bosques de hoja caduca, dado que en los de hoja perenne, la continuidad temporal de la cubierta hace que presenten un comportamiento más homogéneo.

Dentro de bosques de frondosas de hoja caduca, en la época de ausencia de follaje —invierno, bajas temperaturas climáticas—, la temperatura del aire puede ser mayor que en el exterior, dado que la velocidad del viento se reduce y la radiación solar puede penetrar por la cubierta. Sin embargo, cuando los árboles de una cubierta presentan todas sus hojas —verano, temperaturas climáticas más altas—, los extremos de temperatura dentro del bosque son por lo general menores que los del exterior a la masa (Barnes *et al.*, 1998).

Tablas con datos comparativos entre temperaturas bajo diferentes tipos de cubierta forestal y localizaciones carentes de vegetación aparecen recogidas frecuentemente en textos de ecología vegetal, entre los que puede reseñarse los de Pardé (1978) ó Kimmins (1997). La cuantificación específica de estas diferencias ha sido abordada en un buen número de trabajos, variando en función de la localización geográfica y fisiográfica del lugar de observación, así como del tipo, estructura y densidad del dosel vegetal, siendo de escasa utilidad su extrapolación a otras estaciones forestales.

Modificación de la Humedad Atmosférica

Si bien tanto el punto de rocío como la tensión de vapor de agua y la humedad absoluta del aire pueden ser similares a las de áreas descubiertas contiguas, el aire retenido en y bajo una cubierta vegetal es relativamente menos seco (mayor humedad relativa) con independencia de las estaciones. Consecuentemente, el microclima del bosque es más húmedo que un sitio desnudo.

Este hecho es resultado de tres circunstancias que actúan conjuntamente:

- La vegetación supone una fuente directa de vapor de agua a la atmósfera, consecuencia directa del proceso de transpiración.

- Las temperaturas máximas son en general más bajas, lo que incrementa las tasas de humedad relativa. Las cubiertas forestales absorben sin duda más radiación pero evapotranspiran más, por lo que ponen menos calor en el aire que las áreas abiertas.

- La presencia de dosel vegetal actúa a su vez como «recipiente» al dificultar la renovación del aire bajo él retenido.

Muy dependientes del estado energético del aire —eficacia térmica del clima—, de la disponibilidad de agua y de la eficacia de los mecanismos de transporte, extraordinariamente variables en el tiempo y en el espacio, los patrones de variación de la humedad atmosférica bajo dosel vegetal son especialmente complejos de determinar.

Los perfiles verticales de la humedad atmosférica reflejan de forma frecuente un descenso con la altura de la presión de vapor de agua durante el día, con una ligera inversión (incremento) al nivel donde es máxima la densidad del follaje; en ese espacio se concentra la absorción de energía radiante (energía disponible para la evapotranspiración) con las fuentes de vapor de agua (transpiración).

Durante la noche, con condiciones más o menos isotérmicas, los valores más elevados de humedad relativa aparecen cerca del suelo forestal, dado que la presión de vapor es ligeramente mayor en ese nivel, lo que favorece la aparición de hidrometeoros como el rocío. La posible condensación del agua unida al débil flujo de evaporación procedente del suelo hace que los perfiles verticales se vuelvan más complicados. La formación de rocío queda confinada a la parte más baja de la corona de copas y, en ausencia de éste, la presión de vapor de agua es una función decreciente con la altura, con una suave evaporación procedente de la su-

perficie del suelo, única fuente de vapor de agua presente bajo la cubierta (Arya, 2001).

En su variación horizontal, las diferencias entre localizaciones son aún más complejas, con gradientes más débiles y variaciones diurnas de reducida amplitud, al dominar dentro de la cubierta los procesos mecánicos de mezcla asociados al comportamiento dinámico del aire.

Estas peculiaridades ligadas a su variabilidad han hecho que la humedad atmosférica no haya sido una variable de estado frecuentemente utilizada en la caracterización del comportamiento microclimático de las cubiertas forestales. La aparición de equipos de medición más versátiles ha propiciado que empiece a ser contemplada en mayor medida, como demuestran los estudios de Constantin *et al.* (1998), Morecroft *et al.* (1998), Chen y Franklin (1997) y Chen *et al.* (1993).

Modificación de la Velocidad del Viento

Las cubiertas vegetales forestales son particularmente efectivas en modificar el viento. Al ser «porosas» permiten que parte del viento circule por su interior, donde las importantes áreas de troncos, ramas y hojas ofrecen una elevada superficie de fricción —medio especialmente rugoso— la cual reduce de forma efectiva la velocidad del viento, haciendo que el microclima del bosque sea, consecuentemente, menos ventoso.

La principal diferencia entre el flujo dentro del dosel y el experimentado sobre él es que una gran cantidad de momento es absorbido a lo largo de toda su profundidad. En cubiertas forestales altas y cerradas, la mayor parte del momento es absorbido en la parte más alta de la cubierta, donde es mayor la densidad foliar. Por debajo de ese nivel, la velocidad del viento puede incrementarse, siempre y cuando no exista sotobosque que extienda la superficie de fricción hasta las proximidades del suelo, espacio este último en el que la rugosidad superficial invierte de nuevo esta tendencia. El resultado es la posible aparición de un máximo relativo de velocidad de viento en el espacio que va desde la superficie del suelo a las partes más bajas de la corona de copas (Arya, 2001).

De acuerdo con lo anterior, el viento penetra en el borde de la cubierta forestal con más velocidad en el espacio entre los troncos que en el denso dosel, arrasando gases y partículas (gotitas, esporas, semillas y otros cuerpos de reducido peso), si bien la penetración

se extingue unas decenas de metros en el interior, depositando aquellos elementos más pesados. Más allá de esta distancia, el movimiento del aire dentro de la cubierta vegetal se mantiene por fricción con el aire exterior y por intercambio de momento a través de la cubierta.

La turbulencia mecánica generada por la rugosidad de los elementos de las copas y la turbulencia convectiva, causada por el desigual calentamiento en el espacio de los troncos o en el suelo, provocan una acusada mezcla del aire, por lo que la velocidad del viento varía poco con la altura o localización bajo las copas (Raynor, 1971).

Si bien el grado de atenuación de la intensidad del viento en la cubierta aumenta con la velocidad del viento exterior a la masa, el perfil del mismo en una cubierta forestal depende de la composición, densidad y estructura espacial de la masa. La fuerte variabilidad espacial de estos factores, unido al especialmente rápido e irregular patrón de variación de la velocidad del viento, complica de forma extraordinaria la medición de esta variable de estado dentro de los doses, circunstancia que ha hecho que los intentos de evaluación hayan arrojado escasos resultados prácticos, apareciendo escasamente recogidos en la bibliografía.

Modificación de la Temperatura del Suelo

El suelo presente bajo las cubiertas vegetales ve modificado su estado energético, básicamente, al verse alterados los mecanismos de transferencia de calor que en él se desarrollan, en especial, aquéllos que participan en mayor medida en el intercambio energético con la atmósfera próxima a él. En este sentido:

— El grado de porosidad y profundidad que presenta el dosel forestal repercute directamente sobre las tasas de energía radiante absorbida y emitida por el suelo. A mayor altura y densidad de cubierta, más elevadas son las tasas de intercepción y menor el tamaño y cantidad de manchas de luz que batan el suelo, por lo que la energía recibida por la superficie del suelo es netamente inferior a la de los sitios descubiertos. Aunque los flujos de radiación de onda larga provenientes de la cubierta vegetal se incrementan, compensando las diferencias entre los flujos de radiación entrantes, el resultado es una menor tasa de absorción energética por parte del suelo bajo el dosel forestal, por lo que su emisividad de radiación de onda larga se

ve también disminuida y el balance neto de radiación tiende a reducirse en amplitud.

— El comportamiento energético de la materia orgánica depositada en superficie hace que actúe como eficaz aislante térmico que dificulta los flujos de calor hacia el interior del suelo. Su abundancia superficial genera un incremento en los flujos de calor sensible y latente desde la superficie absorbente y una reducción de los flujos de calor hacia los horizontes más profundos del suelo.

— La conductividad térmica interna del suelo dirige la difusión de la energía por el interior del suelo, siendo ésta muy dependiente de la porosidad, la naturaleza de los componentes y la tasa de saturación hídrica que definen el medio edáfico.

— La elevada rugosidad que supone la cubierta forestal respecto de los desplazamientos del aire, hace que su renovación en las partes más próximas al suelo se vea considerablemente reducida, por lo que los flujos de calor latente y de calor sensible por advección desde la superficie del suelo se ven claramente perjudicados.

Dado que la energía no radiante presenta flujos de variación sensiblemente más lentos, el régimen térmico del suelo refleja en su comportamiento temporal el régimen cíclico de variación de la radiación neta. La temperatura de la superficie del suelo se describe por una onda de variación senoidal con el tiempo y que presenta un valor medio, amplitud y constante de fase marcadamente diferentes según se trate de áreas con suelo desnudo o con cubierta forestal (Kleunder *et al.*, 1993).

Este patrón de variación se ve matizado de forma apreciable con la profundidad, al generar un doble efecto sobre la onda térmica: amortiguamiento (la variación en temperatura del suelo decae bruscamente con la profundidad, dado que tanto el suelo mineral como los horizontes orgánicos son pobres conductores del calor) y desfase temporal de la onda térmica (la curva de variación diaria de la temperatura del aire se adelanta en relación con la del suelo durante las horas de iluminación, alcanzando un valor máximo inferior, mientras que durante el atardecer y la noche ambas curvas son casi similares (Payne y Gregory, 1992)). Se considera, por lo general, que profundidades de suelo superiores a 50 cm sólo se ven afectadas por oscilaciones estacionales de la temperatura, pero no por los cambios diarios (Arya, 2001).

De esta forma, en suelos donde la cubierta está ausente o es escasa, como ocurre en regiones semiáridas, el flujo de calor al suelo juega un papel importante

dentro del reparto energético superficial, mientras que en áreas con dosel vegetal completo, el papel en la distribución de la radiación neta es más limitado, lo que se traduce en variaciones de las temperaturas del suelo menos acusadas y con un patente desfase temporal. Así, y en general, los suelos bajo cubierta forestal presentan una amplitud de variación térmica más reducida, siendo más cálidos en el invierno y más fríos durante el verano que en áreas carentes de vegetación (Pardé, 1978; Aussenac, 2000; Gómez Sanz, 2002).

A diferencia de lo ocurrido con las variables de estado del aire, la modificación que la presencia de un dosel vegetal provoca en la temperatura del aire respecto de localizaciones desnudas de vegetación ha sido escasamente investigada. Trabajos como los de Wilson *et al.* (2000) y Gómez Sanz (2002) ya se centran en este objetivo.

El estudio de la respuesta microclimática bajo cubiertas forestales

Las principales peculiaridades que presenta el estudio del microclima se encuentran relacionadas con su inherente eclecticismo, unido a la complejidad de su evaluación cuantitativa. Las fuertes interrelaciones que se establecen entre las condiciones microescálicas del sistema físico aire-suelo y los seres vivos que lo pueblan han hecho muy difícil el estudio separado de los aspectos más específicamente microclimáticos. Esta falta de delimitación efectiva de su ámbito científico ha apartado a muchos investigadores de la microclimatología como su principal campo de actividad, habiéndose acercado a ella de forma colateral y secundaria, con objetivos dispares que, en cierta medida, han desdeñado el papel fundamental que el microclima desempeña en la existencia de vida en la Tierra.

A esto se superpone la espacial heterogeneidad de la interfase atmósfera-superficie terrestre, que hace que los procesos base se desarrollen condicionados por un conjunto de factores que se mueven dentro de un campo de variación especialmente amplio. La ausencia de uniformidad causa un elevado rango de distribución espacial de pequeñas áreas fuente y sumidero de energía que combinadas con la turbulencia intermitente del aire provocan una, aun mayor, variabilidad espacial (Baldocchi *et al.*, 2000). Estas circunstancias hacen que el transporte tridimensional de energía y materia sea principalmente un proceso estocástico y,

consecuentemente, casi imposible de cuantificar con cierta precisión.

Circunscribiéndose al ámbito de los sistemas naturales, un análisis de los trabajos consultados permite extraer algunas consideraciones que enmarcan el estado actual del conocimiento sobre el tema y que a continuación se relacionan.

Aspectos microclimáticos evaluados

La aproximación al conocimiento microclimático se ha realizado, mayoritariamente, mediante la caracterización estadística de la variabilidad, tanto espacial como temporal, de:

— Variables de estado del sistema aire-suelo. La gran mayoría de trabajos incluyen distintas variables, más o menos relacionadas, siendo especialmente escasos los estudios exclusivos de una única variable. La temperatura del aire y la luminosidad (radiación de onda corta) son las variables de estado recurrentemente observadas (ya los primeros estudios se centraban básicamente en su análisis e interpretación), junto con la velocidad del viento y la humedad atmosférica (déficit de presión de vapor y humedad relativa), aunque estas últimas en menor medida. La temperatura del suelo, olvidada inicialmente (Aussenac, 2000), ha sido considerada en los últimos años como una variable inevitable, dado que de forma sencilla evalúa el estado energético de la parte más externa de la corteza terrestre, elemento muy determinante del sistema. Variables como la radiación neta o la humedad edáfica han sido escasamente contempladas, y otras como la cantidad y calidad de la capa superficial de materia orgánica fresca, comienzan a ser tenidas en cuenta (Wilson *et al.*, 2000).

— Los distintos intercambios de energía y materia (flujos) que se desarrollan en la interfase atmósfera-superficie terrestre. El objeto principal de este grupo de estudios es evaluar y caracterizar los distintos flujos que en el tiempo se establecen entre los diferentes componentes del sistema aire-suelo, lo cual posibilita la aproximación al conocimiento del patrón de variación de la energía disponible, así como las características del reparto de la misma, que repercute tanto en los ciclos de la materia del sistema ecológico como en la respuesta fisiológica de las fitocenosis. Estudios científicos sobre los intercambios de masa y energía en suelos desnudos han sido relativamente frecuentes desde la primera mitad del siglo XX, siendo todavía

hoy en día un campo muy activo de investigación. Sin embargo, existen relativamente pocos estudios con mediciones directas de los ratios y procesos de control sobre el sistema con suelo bajo cubierta vegetal (Baldocchi *et al.*, 2000) si se compara con la literatura sobre intercambios de masa y energía en suelos carentes de vegetación.

Paralelamente, la compleja evaluación, tanto directa como indirecta de los dispares aspectos micrometeorológicos, ha llevado al intento de abordar su estudio e interpretación a partir del desarrollo de distintos modelos teóricos que suponen aproximaciones empíricas a los mismos, recurriendo en algunos casos a teorías más o menos sofisticadas sobre el comportamiento de los diferentes componentes del sistema. El objetivo principal resulta ser básicamente el de parametrizar las transferencias suelo-vegetación-atmósfera, tanto de energía como de materia, algoritmos que son incorporados en modelos climáticos, meteorológicos e hidrológicos. Sobre estas premisas, han sido abundantes los modelos desarrollados que recogen los resultados de diferentes proyectos sobre Transferencias-Suelo-Vegetación-Atmósfera (SVATS), abordados en escalas temporales y espaciales muy variadas. Aproximaciones recientes son las debidas a Raupach (1995), Constantin *et al.* (1998) y Baldocchi *et al.* (2000), centrándose en la combinación de modelos de transporte turbulento con la parametrización de las fuentes y sumideros de energía, humedad y gases traza —dióxido de carbono, por ejemplo.

No obstante, estas modelizaciones presentan limitaciones derivadas de la elevada heterogeneidad de las condiciones naturales, lo que hace de los modelos desarrollados una herramienta de uso muy restringido a las localizaciones que permitieron construirlos y calibrarlos, siendo poco factible su extrapolación. Ciertas variables de estado (por ejemplo la temperatura del suelo —Kluender *et al.*, 1993—) tienen un comportamiento que puede ser adecuadamente previsto con la aplicación de modelos de balance energético, si bien la variación espacial de los parámetros de entrada limita la aplicación de los mismos a ambientes forestales heterogéneos.

Métodos y equipos de evaluación

El comportamiento próximo a la estocasticidad que caracteriza el sistema aire-suelo ha obligado a utilizar la aproximación empírica para evaluar y predecir pa-

trones microclimáticos de comportamiento (Chen y Franklin, 1997), estando ésta basada en medidas simples de las condiciones locales del mismo.

Las medidas directas de variables de estado son relativamente fáciles, por lo que han sido el camino frecuentemente utilizado. No ocurre lo mismo con los flujos, para los que las medidas directas no son todavía frecuentes, a pesar de la aparición en el mercado de nuevos instrumentos más prácticos y precisos; probablemente debido a las limitaciones que aún presentan éstos (problemas de calibración, fragilidad, nivel de exactitud,...), que hace inevitable contrastar los datos registrados con valores obtenidos de la aplicación de distintos modelos empíricamente desarrollados (Evet, 2000). A pesar de ello, siempre que ha sido técnicamente posible, se ha recurrido a su medición directa, como es el caso de los flujos de radiación y de calor en el suelo; en otros procesos, como la evaluación de los flujos de calor sensible y latente, la excesiva complejidad de los mecanismos que los gobiernan ha hecho imposible su estimación directa, por lo que ha sido necesario recurrir a métodos indirectos, siendo los de uso más extendido el ratio de Bowen (Constantin *et al.*, 1998) el método de Penman-Monteith (Raupach, 1995) y el de correlación turbulenta (Wilson y Baldocchi, 2000; Wilson *et al.*, 2000; Baldocchi *et al.*, 2000).

Estos métodos indirectos son básicamente aplicables a flujos ascendentes y representan una medida superficial para un cierto área de ascendencias, frecuentemente llamada «huella». La localización y el tamaño de ésta cambian con la dirección y velocidad del viento, por lo que los valores obtenidos sólo son válidos para una constantemente cambiante «huella» de una localización, siendo difícilmente representativos de la cubierta vegetal completa, dado lo demasiado heterogéneo de la organización espacial de los sistemas forestales.

Así mismo, los valores de las variables implicadas en los mismos son especialmente difíciles de obtener, sobre todo algunos muy específicos como la resistencia superficial y aerodinámica. La resistencia de superficies rugosas como las cubiertas vegetales depende de la altura, área foliar y estado hídrico de las plantas que las componen, por lo que su evaluación es muy compleja, habiéndose determinado valores para algunos cultivos a través de estudios específicos, siendo muy escasos los relativos a las cubiertas forestales.

Paralelamente a estas limitaciones, los equipos de medición de las variables implicadas en los respectivos métodos de evaluación de flujos son excesivamente sofisticados, precisos y rápidos, de complicada cali-

bración y manejo, y no siempre fácil adquisición, lo cual lleva a una deficiente accesibilidad y escasas posibilidades de aplicación práctica de los mismos.

Por otro lado, dentro del estudio de la variabilidad espacial, el método recurrente para estudiar la variabilidad vertical ha sido la instalación de torres instrumentalizadas que evalúan las distintas variables de estado o flujos a diferentes niveles dentro de la cubierta vegetal, lo cual posibilita la elaboración e interpretación de los perfiles de variación de las mismas. Raynor (1971), Aussenac y Ducrey (1977a y 1977b) y Costantin *et al.* (1998) suponen ejemplos válidos de esta metodología.

La aproximación al conocimiento de la variabilidad horizontal ha obligado a seguir un proceso operativo netamente distinto, consistente en la selección e instrumentalización de diferentes parcelas de observación, repartidas bajo las cubiertas de acuerdo con el objetivo específico a cubrir en la investigación. En los sistemas ecológicos terrestres, ciertos estudios se han circunscrito a localizaciones concretas dentro de la extensión que ocupan las cubiertas vegetales: bordes forestales (Gehlhausen *et al.*, 2000; Saunders *et al.*, 1999; Chen y Franklin, 1997; Chen *et al.*, 1993), aperturas forestales (Blennow, 1998; Carlson y Groot, 1997; Balisky y Burton, 1995; Kubin y Kemppainen, 1991; Aussenac, 1973), o bien han constituido comparaciones entre las condiciones micrometeorológicas en el interior de cubiertas forestales y el exterior de las mismas (Morecroft *et al.*, 1998; Taniguchi *et al.*, 1998; Ghuman y Lal, 1987; Gómez Sanz, 2002).

Por último, desde un punto de vista temporal, la gran mayoría de los trabajos realizados se han enmarcado en períodos relativamente cortos (semanas, meses o estaciones de crecimiento) por lo que sus resultados difícilmente pueden considerarse dentro del ámbito microclimático y sí dentro del micrometeorológico, reflejando patrones de variación diarios o, a lo sumo, estacionales. Trabajos de más de un año de duración, en el que se completan todas las fases que de forma regular se repiten en la fisiología vegetal, han sido más bien escasos. Los últimos trabajos desarrollados (Morecroft *et al.*, 1998; Gómez Sanz, 2002) siguen ya esta línea de actuación de mayor amplitud en el período de observación.

Respuesta microclimática y condiciones de estación

Tampoco se presenta uniformidad en los distintos métodos empleados en el análisis de la incidencia que

los diferentes elementos del sistema aire-suelo tienen en el comportamiento micrometeorológico y microclimático de las variables de estado manejadas.

La trascendencia micrometeorológica de las peculiaridades de la estación (la fisiografía local junto con el tipo de cubierta forestal, densidad y estructura de la misma) han centrado, habitualmente de forma marginal, el interés de estudio. Los trabajos realizados se han circunscrito, en la mayor parte de los casos, a un determinado tipo de comunidad vegetal, siendo todavía poco frecuentes trabajos que comparan el comportamiento micrometeorológico de distintas formaciones vegetales (Oliver *et al.*, 1987; Balisky y Burton, 1995; Morecroft *et al.*, 1998; Gómez Sanz, 2002).

Así mismo, las variables empleadas en caracterizar la densidad y estructura de las cubiertas forestales han sido muy distintas en los diferentes trabajos consultados. En especial, las variables que cuantifican la densidad de las masas forestales han sido escasamente empleadas (aunque, paradójicamente, fueron las primeramente utilizadas en los estudios abordados a principios del siglo XX). Los últimos trabajos recogen, sin embargo, una clara tendencia a utilizar variables de estructura, como el índice de área foliar (LAI) y las longitudes de rugosidad, que son por el contrario más complejas de evaluación y de traducción práctica.

Por otro lado, el estudio del papel microclimático de la fisiografía sobre las variables de estado bajo cubiertas forestales no ha sido un aspecto especialmente tratado. En el ámbito español, son reseñables los estudios de Gandullo (1974 y 1997) que inciden sobre la evaluación cuantitativa de la insolación en función de la orientación y de la pendiente del terreno, junto con análisis de sus implicaciones térmicas.

Tampoco son frecuentes las comparaciones entre estaciones que responden a situaciones microclimáticas a priori diferentes, y que representan distintas situaciones o manejos de la masa forestal. Existen relativamente pocos estudios que analicen las diferencias microclimáticas entre aperturas forestales de diferentes tamaños y configuraciones, e incluso menos sobre las implicaciones de estas diferencias en la regeneración forestal (Carlson y Groot, 1997) o en el desarrollo posterior de los pies reservados.

Situación parecida se aprecia en el conocimiento de las condiciones microclimáticas en bordes forestales y su dinámica temporal. Excepto al principio del siglo XX en Europa, han sido particularmente escasos los estudios sistemáticos del microclima en y cerca de los bordes forestales (Chen *et al.*, 1993), ten-

dencia que empieza a cambiar con trabajos que vienen a estimar cómo los bordes forestales afectan al comportamiento microclimático (Packham *et al.*, 1992; Forman, 1995; Chen y Franklin, 1997; Gehlhausen *et al.*, 2000), reafirmando la necesidad de conocimiento del efecto y funciones de los bordes y áreas adyacentes sobre las aperturas y el interior de las cubiertas forestales.

A destacar, por último, los estudios que se han venido desarrollando en las últimas décadas sobre las consecuencias microclimáticas de las actuaciones selvícolas, buscando aportar herramientas y soluciones que hagan más exitosa la práctica de la silvicultura. Estos suponen aportaciones de marcado carácter aplicado y entre las que se pueden incluir los trabajos de Roussel (1970), Aussenac (1973), Ghuman y Lal (1987), Kubin y Kemppainen (1991), (Balisky y Burton, 1995), Carlson y Groot (1997), Taniguchi *et al.* (1998) y Blennow (1998).

Valoración final

Llegado a este punto, parece indudable que el conocimiento e interpretación de las relaciones de interacción e interdependencia que llevan al equilibrio microclima-cubierta forestal resultan inevitables para entender la estructura y función de los ecosistemas forestales, así como para garantizar la persistencia y el uso continuado y múltiple de las fitocenosis que los integran.

En este sentido, cualquier modificación en la composición y estructura de las masas forestales, derivada o no de su uso selvícola, se traduce en una ruptura del equilibrio previamente establecido, lo que en función del grado de alteración provocado, puede llevar a situaciones de riesgo que comprometan la estabilidad y persistencia de la masa intervenida. Valorar adecuadamente las consecuencias del desequilibrio microclima-cubierta forestal que conlleva el aprovechamiento ordenado de las masas forestales, ha de ser esencial en el campo de la Ingeniería Forestal, dado que posibilitaría el desarrollo, evaluación y mejora de las alternativas selvícolas a emplear en el manejo sostenible de los sistemas forestales, tanto en la fase de instalación de la cubierta, como en la de aplicación de los posibles tratamientos selvícolas que lleven a su aprovechamiento y/o regeneración.

No obstante, esta tarea no resulta nada fácil. Las condiciones microclimáticas que aparecen bajo las cu-

biertas forestales muestran entre sus caracteres más reseñables una marcada heterogeneidad espacial, respuesta a la desigual disposición, tanto vertical como horizontal, de los individuos que componen los doseles vegetales forestales. Esta circunstancia, característica inherente a los sistemas forestales, resulta imposible de soslayar y dificulta enormemente el estudio e interpretación de las condiciones microclimáticas que se desarrollan bajo sus cubiertas.

Quizá por ello, el estudio de las relaciones microclima-cubierta forestal presenta, a día de hoy, carencias notables, de entre las que cabe destacar: (1) la escasez de estudios específicos sobre condiciones microclimáticas bajo cubiertas vegetales de vocación forestal, y en especial de aquéllos que manejan variables de espesura y morfométricas sencillas, lo cual supone todavía una falta de conocimiento sobre la trascendencia microclimática de su manipulación; (2) la patente falta de uniformidad en los trabajos desarrollados, tanto en enfoques y objetivos perseguidos como en material y métodos empleados, lo cual dificulta de forma considerable su síntesis e integración; (3) la deficiente aplicabilidad práctica de gran parte de los mismos, debido, sobre todo, a que están muy determinados por las condiciones particulares de la estación o por el periodo temporal de observación, lo que hace escasamente factible su extrapolación a otras localizaciones.

A pesar de estas limitaciones y carencias, la profundización en el conocimiento del microclima forestal ha de constituir una línea activa de investigación dentro del conocimiento de la estructura y función de los sistemas ecológicos, de tal forma que el acercamiento a los procesos base pueda proporcionar predicciones más o menos precisas de los efectos del microclima forestal a escalas más amplias, sobre diferentes tipologías de estación forestal.

Bibliografía

- ARYA S.P., 2001. Introduction to Micrometeorology. Second Edition. International Geophysics Series. Volume 79. Academic Press. London. 420 pp.
- AUSSENAC G., 1973. Étude microclimatique de coupes par bande en forêt d'Epinal (Vosges). Comparaison avec la coupe rase. *Reveu forestière française*, XXV-4, 283-293.
- AUSSENAC G., DUCREY M., 1977a. Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. I. Analyse des profils microclimatiques et des caractéristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire. *Ann Sci Forest* 34(4), 265-284.
- AUSSENAC G., DUCREY M., 1977b. Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. II. Etude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Ann Sci Forest* 36(4), 265-280.
- AUSSENAC G., 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Ann For Sci* 57, 287-301.
- BALDOCCHI D.D., LAW B.E., ANTHONI P.M., 2000. On measuring and modeling energy fluxes above the floor of a homogeneous and heterogeneous conifer forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 102, 187-206.
- BALISKY A.C., BURTON P.J., 1995. Root-zone soil temperature variation associated with microsite characteristics in high-elevation forest opening in the interior of British Columbia. *Agricultural and Forest Meteorology* 77, 31-54.
- BARNES B.V., ZAK D.R., DENTON S.R., SPURR S.H., 1998. *Forest Ecology* (4th Edition). John Wiley & Sons, Inc. New York. 397 pp.
- BARRY R.G., CHORLEY R.J., 1999. *Atmósfera, tiempo y clima*. Séptima edición. Ediciones Omega S.A., Barcelona. 441 pp.
- BLENNOW K., 1998. Modelling minimum air temperature in partially and clear felled forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 91, 223-235.
- BURROWS C.J., 1990. *Processes of vegetation change*. Boston Mass: Unwin Hyman. Boston (USA). 551 pp.
- CALDENTEY J., IBARRA M., PROMIS A., DONOSO S., 2001. Utilización silvícola de un bosque natural de lenga (*Nothofagus pumilio*) en Chile: efectos microclimáticos y en el desarrollo de la regeneración. *Actas del III Congreso Forestal Español* (Mesa 1). Junta de Andalucía. Granada. 129-134.
- CAMPO M. del, PEÑA F., 1922. Estudios de absorción de la luz relativos a especies forestales. Colección Selvicultura española. Gráficas Reunidas, S.A. Madrid. 72 pp.
- CARLSON D.W., GROOT A., 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 87, 313-329.
- CHEN J., FRANKLIN J.F., 1997. Growing-season microclimate variability within an old-growth Douglas-fir forest. *Climate Research* 8, 21-34.
- CHEN J., FRANKLIN J.F., SPIES T.A., 1993. Contrasting microclimates among clearcut, edge, and interior of old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 63, 219-237.
- CHEN J., SAUNDERS S.C., CROW T.R., NAIMAN R.J., BROSOFSKE K.D., MROZ G.D., BROOKSHIRE B.L., FRANKLIN J.F., 1999. Microclimate in forest ecosystem and landscape ecology. *BioScience* 49/4, 288-297.
- CONSTANTIN J., INCLAN M.G., RASCHENFORD M., 1998. The energy budget of a spruce forest: field measurements and comparison with the forest-land-atmosphere model (FLAME). *Journal of Hidrology* 212-213, 22-35.
- CUADRAT J.M., PITA M.F., 1997. *Climatología*. Ediciones Cátedra. Madrid. 496 pp.

- DE CASTRO F., FETCHER N., 1998. Three dimensional model of the interception of light by a canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 90, 215-233.
- DÍAZ-MAROTO I.J., SILVA F.J., PRUNEL A., 1994. Variaciones de la intensidad lumínica y la temperatura bajo cubierta de frondosas caducifolias en una zona de «fraga mixta» en Galicia. *Anais do Instituto Superior de Agronomía*, 467-480.
- ESCUADERO J.C., CABEZAS J., LAVADO., 1993. Influencia de las coberturas de encinas, *Quercus ilex* subsp. *ballota*, en la rotura de perfiles térmicos verticales. *Actas del Congreso Forestal Español. Tomo I. Lourizan (Pontevedra)*. 87-92.
- EVETT S.R., 2000. Energy and Water Balances at Soil-Plant-Atmosphere Interfaces. In SUMNER, M.E. (ed) *Handbook of Soil Science*. CRC Press. New York. A129-A182.
- FORMAN R.T.T., 1995. *Land Mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press. Cambridge. 632 pp.
- FUENTES YAGÜE J.L., 2000. *Iniciación a la Meteorología y la Climatología*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 222 pp.
- GALIANA F., PÉREZ BADÍA R., CAMARERO E., ESTRUCH V., CURRAS R., 2001. Estimación de la Radiación solar incidente en pinares de *Pinus halepensis* sometidos a tratamientos selvícolas de cortas finales. *Actas del III Congreso Forestal Español (Mesa 1)*. Junta de Andalucía. Granada. 222-229.
- GALOUX A., 1981. Radiation flux through the atmosphere-biosphere system. En REICHLÉ D.E. (ed.) *Dynamic properties of Forest Ecosystems*. Cambridge University Press. Cambridge. 88-98, 120-157.
- GANDULLO J.M., 1974. Ensayo de evaluación cuantitativa de la insolación en función de la orientación y de la pendiente del terreno. *Anales INIA. Serie Recursos Naturales*, 1, 95-107.
- GANDULLO J.M., 1994. *Climatología y Ciencias del Suelo*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S.I. Montes. Madrid. 404 pp.
- GANDULLO J.M., 1997. Implicaciones térmicas de la topografía: ensayo de un parámetro. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 6(1/2), 7-15.
- GANDULLO J.M., BAÑARES A., BLANCO A., CASTROVIEJO M., FERNÁNDEZ LÓPEZ A., MUÑOZ L., SÁNCHEZ PALOMARES O., SERRADA R., 1991. Estudio ecológico de la laurisilva canaria. Colección Técnica. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 110 pp.
- GARCÍA DEL BARRIO J.M., 2000. Comportamientos y flujos de biomasa y nutrientes en un pinar de *Pinus sylvestris* L. en el Monte de Valsaín. INIA. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid. 178 pp.
- GEHLHAUSEN S.M., SCHWARTZ M.W., AUGSPURGER C.K., 2000. Vegetation and microclimatic edge in two mixed-mesophytic forest fragments. *Plant Ecology* 147, 21-35.
- GEIGER R., 1965. *The climate near the ground*. Harvard University Press. Cambridge. 611 pp.
- GHUMAN B.S., LAL R., 1987. Effects of partial clearing on microclimate in a humid tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 40, 17-29.
- GIL L., PARDO F., ARANDA I., PARDOS J.A., 1999. *El hayedo de Montejo: pasado y presente*. Comunidad de Madrid. Madrid. 170 pp.
- GÓMEZ SANZ V., 2002. *Micrometeorología de masas forestales de pino silvestre (Pinus sylvestris L.) y rebollo (Quercus pyrenaica Willd.) en la vertiente norte del Sistema Central (Montes de Valsaín-Segovia)*. Consecuencias Selvícolas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- JANSÁ J.M., 1969. *Curso de Climatología*. I.N.M. Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid. 445 pp.
- KIMMINS J.P., 1997. *Forest Ecology*. Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 596 pp.
- KLUENDER R.A., THOMPSON L.C., STEIGERWALD D.M., 1993. A conceptual model for predicting soil temperatures. *Soil Science* 156(1), 10-19.
- KUBIN E., KEMPPAINEN L., 1991. Effect of clearcutting of boreal spruce forest on air and soil temperature conditions. *Acta Forestalia Fennica* 225, 1-42.
- LEE R., 1978. *Forest Microclimatology*. Columbia University Press. New York. 276 pp.
- LEMÉE G., 1978. *Précis d'écologie végétale*. Masson. París. 291 pp.
- MONTEITH J.L. (ed), 1975. *Vegetation and the atmosphere*. Volume 1, Principles. Academic Press. London. 278 pp.
- MORECROFT M.D., TAYLOR M.E., OLIVER H.R., 1998. Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site. *Agricultural and Forest Meteorology* 90, 141-156.
- OLIVER S.A., OLIVER H.R., WALLACE J.S, ROBERTS A.M., 1987. Soil heat flux and temperature variation with vegetation, soil type and climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 39, 257-269.
- PACKHAM J.R., HARDING D.J.L., HILTON G.M., STUTTARD R.A., 1992. *Functional Ecology of Woodlands and Forests*. Chapman & Hall. 408 pp.
- PARDÉ J., 1978. El microclima del bosque. En PESSON, P., *Ecología Forestal*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 29-46.
- PAYNE D., GREGORY P.J., 1992: La temperatura del suelo. En WILD, A. (Coord), *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 295-311.
- PESSON P., 1978. *Ecología Forestal*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 393 pp.
- RAPP I., LAGO J., CAZALLA D., 2001. INSOPRO, un programa para el cálculo de modelos digitales de radiación solar. *Actas del III Congreso Forestal Español (Mesa 1)*. Junta de Andalucía. Granada. 448-451.
- RAUPACH M.R., 1995. Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy and regional scales. *Agricultural and Forest Meteorology* 73, 151-179.

- RAYNOR G.S., 1971. Wind and Temperature Structure in a Coniferous Forest and a Contiguous Field. *Forest Science* 17(3), 351-363.
- ROJO A., MONTERO G., 1996. El pino silvestre en la Sierra de Guadarrama. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 293 pp.
- ROJO SAIZ F., 1977. Fotología forestal y ordenación. *Montes* 187, 31-34.
- ROSS J., 1975. Radiative Transfer in Plant Communities. En MONTEITH J.L. (ed.) *Vegetation and Atmosphere. Volume I, Principles*. Academic Press. Londres. 13-56.
- ROUSSEL L., 1970. Le microclimat de la coupe par bande. *Revue forestière française* XXII - 5, 555-559.
- ROUSSEL L., 1972. Photologie forestière. Masson y Cie. París. 136 pp.
- SAUNDERS S.C, CHEN J., DRUMMER, T.D., CROW T.R., 1999. Modeling temperature gradients across edges over time in managed landscape. *Forest Ecology and Management* 117, 17-31.
- SMITH R.L., SMITH T.M., 2001. *Ecología*. Pearson Educación, S.A. Madrid. 942 pp.
- STOUTJESDIJK PH., BARKMAN J.J., 1992. Microclimate, vegetation and fauna. OPULUS Press AB. Uppsala. 216 pp.
- SUTTON O.G., 1953. *Micrometeorology*. McGraw-Hill, New York. 334 pp.
- TANIGUCHI M., WILLIAMSON D.R., PECK A.J., 1998. Estimations of surface temperature and subsurface heat flux following forest removal in the south-west of Western Australia. *Hydrological Processes* 12, 2205-2216.
- TERRADAS J., 2001. *Ecología de la vegetación*. Ediciones Omega, S.A. Barcelona. 703 pp.
- TIVI J., O'HARE G., 1981. *Human Impact on the Ecosystem*. Oliver & Boyd. New York. 243 pp.
- WILSON K.B., BALDOCCHI D.D., 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agric For Meteorol* 100, 1-18.
- WILSON K.B., HANSON P.J., BALDOCCHI, D.D., 2000. Factors controlling evaporation and energy partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle. *Agric For Meteorol* 102, 83-103.