

Estimación del índice de área foliar en pinares de repoblación con LAI-2000 bajo radiación solar directa: relación con variables de inventario e hidrológicas

A. Molina y A. D. del-Campo*

*Re-ForeST (Grupo I+D en Ciencia y Tecnología Forestal. DIHMA en ETSI Agronómica y del Medio Natural).
Universidad Politécnica de Valencia. C/ Camí de Vera, s/n. 46022 Valencia. Spain*

Resumen

El índice de área foliar (LAI) es una variable clave en los procesos de intercepción de la lluvia y la luz en masas forestales y por tanto tiene gran potencial en la práctica de la silvicultura adaptativa al cambio climático, de ahí la necesidad de establecer tanto metodologías sencillas para su estimación, como su relación con las principales variables de gestión forestal. Este trabajo tiene un doble objetivo: 1) determinar la viabilidad del sensor LAI-2000 para estimar el LAI en condiciones de radiación directa aplicando una corrección angular y 2) conocer la utilidad del LAI en el estudio de trascolación de la lluvia (T) en una masa de pino carrasco con distintas intensidades de clara así como sus relaciones con el área basimétrica (G), la densidad de arbolado (D) y la fracción de cabida cubierta (FCC). Los resultados indican que la corrección angular estabiliza los valores LAI-2000 tomados bajo radiación solar directa, permitiendo una mayor operatividad del sensor en condiciones mediterráneas, donde la nubosidad uniforme resulta poco frecuente e imprevisible. La variable FCC fue la que presentó un mayor poder predictivo del LAI ($R^2 = 0,98$; $S = 0,28$), seguida de G ($R^2 = 0,96$; $S = 0,43$) y D ($R^2 = 0,50$; $S = 0,28$). En el aspecto hidrológico, la trascolación aumentó con la intensidad de clara, siendo G la variable más correlacionada ($R^2 = 0,81$; $S = 3,07$) y LAI la que menos ($R^2 = 0,69$; $S = 3,95$). Los resultados evidencian la versatilidad de trabajar con LAI estimado de forma sencilla o bien a partir de inventarios disponibles, para su uso en modelos de mayor ámbito espacial.

Palabras clave: pino carrasco; claras; trascolación; área basimétrica; fracción cabida cubierta; densidad pies; modelo regresión.

Abstract

Leaf area index estimation in a pine plantation with LAI-2000 under direct sunlight conditions: relationship with inventory and hydrologic variables

LAI is a key factor in light and rainfall interception processes in forest stands and, for this reason, is called to play an important role in global change adaptive silviculture. Therefore, it is necessary to develop practical and operative methodologies to measure this parameter as well as simple relationships with other silvicultural variables. This work has studied 1) the feasibility of LAI-2000 sensor in estimating LAI-stand when readings are taken under direct sunlight conditions; and 2) the ability of LAI in studying rainfall partitioned into throughfall (T) in an Aleppo pine stand after different thinning intensities, as well as its relationships to basal area, (G), cover (FCC), and tree density (D). Results showed that the angular correction scheme applied to LAI-2000 direct-sunlight readings stabilized them for different solar angles, allowing a better operational use of LAI-2000 in Mediterranean areas, where uniform overcast conditions are difficult to meet and predict. Forest cover showed the highest predictive ability of LAI ($R^2 = 0.98$; $S = 0.28$), then G ($R^2 = 0.96$; $S = 0.43$) and D ($R^2 = 0.50$; $S = 0.28$). In the hydrological plane, T increased with thinning intensity, being G the most explanatory variable ($R^2 = 0.81$; $S = 3.07$) and LAI the one that showed the poorest relation with it ($R^2 = 0.69$; $S = 3.95$). These results open a way for forest hydrologic modeling taking LAI as an input variable either estimated from LAI-2000 or deducted from inventory data.

Key words: aleppo pine; thinning; throughfall; basal area; forest cover; regression models.

* Autor para la correspondencia: ancamga@dihma.upv.es

Recibido:10-08-10; Aceptado: 26-11-10.

Introducción

El estado de desarrollo de la gestión forestal en nuestra sociedad actual y en particular en las regiones mediterráneas, puede considerarse como de *selvicultura de base ecológica* con tendencia hacia la *selvicultura social* (Kimmins, 2004), caracterizadas por una producción sostenible de productos forestales, o bien por una gestión que mantiene un amplio rango de condiciones y valores propios de los bosques deseados por la sociedad. En cualquier caso, pero especialmente en esta última etapa, la *selvicultura*, a través del inventario, debe ser capaz de caracterizar y conocer de una forma integral los ecosistemas forestales objeto de gestión, valorando determinados elementos y procesos básicos para una correcta gestión. Los avances tecnológicos han dado lugar a un importante desarrollo de técnicas y herramientas aplicables a la inventariación forestal (Saura Martínez de Tira *et al.*, 2005), si bien en la mayoría de los casos están dirigidas a la estimación de los parámetros dasométricos tradicionales (área basimétrica, volumen maderable, densidad, etc.), prescindiéndose menos atención a otras variables relevantes desde el punto de vista de función del ecosistema forestal.

La necesidad de adaptar las masas forestales a las condiciones ambientales previstas para las próximas décadas (Alcamo *et al.*, 2007) hace aun más necesario que el gestor disponga de una información más veraz y representativa del estado y vigor actual de la masa a gestionar. En este sentido, el índice de área foliar (LAI) está reconocido como uno de los parámetros más asociados a los procesos fundamentales del ecosistema forestal (Kozlowski *et al.*, 1991; López Serrano *et al.*, 2000; Asner *et al.*, 2003) y sus aplicaciones trascienden hasta escala de biosfera en estudios de base biofísica (Leblanc y Chen, 2001). Tiene especial relevancia en aspectos tales como la interceptación de la luz, la evapotranspiración y la humedad del suelo (Grier y Running, 1977), la trascolación e interceptación (Aboal *et al.*, 2000) o el estado fisiológico de la vegetación, además de su empleo en modelos de circulación de carbono, climáticos, fisiológicos, hidrológicos y de ecología (Sabaté *et al.*, 2002; Keenan *et al.*, 2009). Desde el punto de vista de la *selvicultura*, está demostrada su utilidad como indicador de productividad forestal (Vose y Swank, 1990; Landsberg y Waring, 1997; Arias *et al.*, 2007) y de daños bióticos o abióticos en las masas forestales (Olthof *et al.*, 2003; Hanssen y Solberg, 2007).

Aunque existen varias definiciones (Asner *et al.*, 2003), el LAI puede definirse como la proyección de área de hoja por área de suelo para planifolias y como la mitad de área de hoja por área de suelo para aciculifolias (Chen y Black, 1992). Para su estimación pueden emplearse tanto métodos directos como indirectos. Los primeros suelen apoyarse en relaciones alométricas, siendo necesario un gran volumen de trabajo de muestreo y el derribo de ciertos árboles, presentando además el inconveniente de que las relaciones alométricas que se obtienen son poco extrapolables (Asner *et al.*, 2003). Los métodos indirectos tienen las ventajas de que son más rápidos, no requieren destruir parte del arbolado y pueden usarse a lo largo del año, de forma que pueden detectar las variaciones anuales del LAI de un ecosistema (Leblanc y Chen, 2001). La mayor parte de ellos se basa en la atenuación que sufre la radiación solar a su paso a través de una cubierta vegetal, siguiendo la ley de Lambert (Monsi y Saeki, 1953). En este grupo, el equipo LICOR LAI-2000 (Li-Cor, Inc., Lincoln, Nebraska, USA) es el más extendido en uso en cubiertas forestales, habiendo generado mucha literatura en los últimos 20 años debido principalmente a factores que complican la base metodológica óptica de lectura del instrumento. Así, se considera que la distribución espacial de las hojas y de su ángulo debe ser aleatoria y que la contribución del tejido no fotosintético a la atenuación de la radiación sea mínima. Es reconocido que el LAI-2000 infrestima el LAI en ciertos tipos de vegetación como las coníferas debido al agrupamiento de acículas y tallos (Deblonde *et al.*, 1994; Stenberg *et al.*, 1994) y la presencia de claros en el dosel forestal (Cescatti, 1998), siempre y cuando la proporción de tejido no fotosintético sea pequeña (Stenberg, 1996). Otros problemas de índole más práctica tienen que ver con la necesidad de operar el instrumento en condiciones de radiación difusa homogéneas, no muy frecuentes en climas mediterráneos. Además, son necesarias dos tipos de medidas para llevar a cabo la estimación del LAI: mediciones sin influencia de vegetación (medidas A) y mediciones bajo la cubierta vegetal en estudio (medidas B). Para cultivos agrícolas, generalmente de poca talla, estas mediciones pueden realizarse con el empleo de un solo equipo, disponiendo el sensor a diferentes alturas (LI-COR, 1991). En cubiertas vegetales de mayor talla, como es el caso de las forestales, suele ser necesario el empleo simultáneo de 2 equipos LAI-2000 (Stenberg *et al.*, 1994; Baynes y Dunn, 1997; López Serrano *et al.*, 2000), de forma que

puedan asegurarse condiciones atmosféricas homogéneas para las medidas A y B (LI-COR, 1991), con lo cual se necesitan dos operarios intercomunicados para el trabajo de campo.

Estas limitaciones, junto a la utilidad y potencialidad del LAI como parámetro de inventario forestal, han dado lugar varios estudios donde se plantean correcciones y metodologías de medición alternativas para hacer más versátil su uso. Así, Leblanc y Chen (2001), proponen el uso del LAI-2000 bajo radiación solar directa haciendo uso exclusivo del cuarto anillo del sensor óptico y aplicando una corrección angular a estas lecturas. Por otro lado, López-Serrano *et al.* (2000), demuestran la trivialidad del coeficiente de corrección por presencia de parte no fotosintética y agrupamiento de acículas en ramas en masas de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill). A partir de estos planteamientos, se diseñó un estudio en el que se pretendía evaluar el uso del LAI-2000 en los procesos hidrológicos de masas monoespecíficas de pino carrasco haciendo uso de los avances y correcciones publicadas en la literatura científica. Con ello, los objetivos del presente estudio son: a) implementar una metodología práctica y sencilla mediante el empleo de un equipo LAI-2000 para realizar mediciones fidedignas del LAI en masas repobladas de *Pinus halepensis* Mill. con diferentes grados de ocupación del espacio; b) estudiar las relaciones entre las medidas tradicionales al uso en inventario forestal (área basimétrica, fracción de cabida cubierta y densidad de pies) y el LAI estimado y, en su caso, validarlas; y c) comparar la idoneidad de los distintos parámetros de inventario y del LAI para la estimación de la trascolación de la lluvia en función de la densidad de la masa.

Material y métodos

Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en la zona suroccidental de la provincia de Valencia (La Hundo, Ayora, 39° 05' 30" N, 1° 12' 30" O), a 950 msnm. El clima es típicamente mediterráneo, con valores medios anuales de 464,4 mm y 13,7°C para precipitación y temperatura, respectivamente. La evapotranspiración anual de referencia para la estación más cercana (estación SIAR de Almansa, Albacete) es de 1.288 mm. La zona se encuentra dominada casi exclusivamente por masas mo-

noespecíficas y coetáneas de *P. halepensis* Mill. procedentes de repoblaciones de la década de los sesenta. La presencia de la especie potencial de la zona, *Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp., se reduce a las partes altas o bien formando parte del sotobosque de los pinares. Los suelos son en su mayoría calcisoles derivados de piedra caliza triásica, con porcentajes elevados de carbonatos (26-38%, pH 7,7-8,2) y textura franco-arcillosa.

Aplicación de tratamientos, diseño experimental y caracterización silvícola

Para el estudio se partió de un rodal monoespecífico de *P. halepensis* Mill. de 50 años edad, 15 m de altura dominante y procedente de una repoblación con densidad de pies inicial de 1.300 pies ha⁻¹. Se practicaron unas claras a fin estudiar su efecto sobre la trascolación. Para ello, se definieron tres intensidades de clara más un control, sobre un diseño de tres bloques completos al azar. Cada intensidad se realizó en una unidad experimental por bloque, siendo cada unidad experimental cuadrada de 30 m de lado (900 m²), considerando 2 m de efecto borde en cada lado (676 m² como superficie efectiva de medición) y sumando en total doce unidades experimentales: tres de control, C; tres de claro de intensidad muy fuerte, F; tres de intensidad moderada, M; y tres de intensidad baja, B. Las cortas fueron realizadas en febrero de 2008 con el criterio de favorecer los mejores individuos y una distribución de la cobertura forestal lo más homogénea posible dentro de cada tratamiento (en algunos casos no se eliminaron pies con crecimiento deficiente para evitar grandes discontinuidades en el dosel).

Un año después de la clara, en cada unidad experimental se llevó a cabo un inventario con objeto de obtener las variables silvícolas siguientes: área basimétrica (G, m² ha⁻¹), diámetro medio (DBH, cm), densidad de pies (D, pies ha⁻¹) y Fracción de Cabida Cubierta (FCC, %). Para los dos primeras variables, se midieron los diámetros a 1,30 m con forcípula y en dos direcciones perpendiculares, mientras que la densidad de pies se obtuvo del conteo directo del número de pies por unidad experimental. Por último, para la determinación de la FCC se utilizó una escuadra óptica, de manera que se realizaron, en cada unidad experimental, cinco transectos lineales paralelos separados entre sí 6,5 m. En cada transecto se llevaron a cabo 10 mediciones (50 por unidad experimental) separadas

aproximadamente 3 m entre sí. Cada medición consistió en cuantificar la presencia (valor 1) o no (valor 0) de parte aérea.

Determinación del índice de área foliar (LAI)

La medición del LAI se llevó a cabo mediante el empleo de un equipo LAI-2000 (Plant Canopy Analyzer, LI-COR, Lincoln, USA). Una de las recomendaciones del fabricante es que el equipo se utilice bajo condiciones de radiación solar difusa o bien al amanecer o atardecer de manera que se evite la radiación directa (LI-COR, 1991). Los días de nubosidad uniforme en la zona de estudio son realmente escasos, su predicción difícil y el uso de un solo equipo durante el amanecer o crepúsculo tampoco es recomendable por el rápido cambio de las condiciones lumínicas en esos instantes del día. Según esto, y de acuerdo al objetivo de este trabajo de implementar una metodología operativa y sencilla, se consideró la realización de mediciones en días completamente despejados tal y como proponen Leblanc y Chen (2001). El inconveniente de usar el LAI-2000 bajo condiciones de radiación solar directa radica en que se producen procesos de dispersión de la luz azul que violan las hipótesis de partida de la metodología empleada por el equipo, de manera que suele producirse una subestimación del LAI. En el citado trabajo, se propone una corrección de las lecturas realizadas bajo radiación solar directa y con el uso exclusivo del cuarto anillo, transformándolas en mediciones bajo radiación difusa, válida para un amplio rango de situaciones. Para la corrección, emplean una ecuación (ecuación 1), que sólo depende del ángulo solar cenital [$\theta_s = f(\text{latitud, declinación solar y ángulo horario})$] en el momento en que se realicen las medidas y del LAI medido:

$$LAIc = \frac{LAI(\theta_s)}{A + Be^{C\theta_s} - (D + E LAI(\theta_s)) \times \left(\frac{(62 - \theta_s)}{(90 + \theta_s)^2} \right)} \quad [1]$$

donde, $LAIc$ es el LAI corregido; $LAI(\theta_s)$ es el LAI medido bajo cierto ángulo solar cenital; A , B , C , D , E son constantes de valores 0,7536, 0,0206, 0,0278, -40 y 10, respectivamente; θ_s es el ángulo solar cenital en el momento de la realización de las medidas.

Para verificar la aplicabilidad de esta metodología en las condiciones consideradas en este trabajo, se comprobó por comparación entre anillos que efectivamente el cuarto anillo del equipo LAI-2000 es el que

se comporta de forma más estable, bajo diferentes ángulos solares cenitales y con diferentes grados de ocupación del espacio. Para ello, se realizaron dos transectos perpendiculares en cada unidad experimental siguiendo sus dos diagonales, con tres mediciones tipo B en cada uno. Cada uno de los dos transectos se realizó a diferentes horas del día (distintos ángulos solares), siguiendo las mismas direcciones de compás en todas las parcelas, con una pestaña de visión de 270° y siempre con el usuario tapando con su sombra el sensor (LI-COR, 1991). El primer transecto (T1, dirección noroeste, $\theta_{sT1} = 22,2^\circ$) se llevó a cabo en todas las unidades entre las 11 h 32' y las 12 h 35' del 7 de mayo de 2009. Las medidas exteriores (tipo A) se realizaron en una zona cercana sin influencia de vegetación en dos tandas, antes y después de las medidas B y con idéntica metodología que éstas. El segundo transecto (T2, dirección noreste, $\theta_{sT2} = 68^\circ$), se realizó entre las 16 h 34' y las 17 h 45' de ese mismo día, con medidas exteriores también antes y después de éstas. Se realizaron también dos series de mediciones bajo nubosidad uniforme. Éstas tuvieron lugar durante las horas centrales de varios días nublados del mes de marzo de 2009 y al atardecer de días despejados del mismo mes, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Para el cálculo del LAI de cada unidad experimental se hizo uso del software informático C-2000, que se adjunta con el equipo LAI-2000. Los valores de LAI que se presentan en este estudio son el resultado de promediar los LAI resultantes de todas las combinaciones posibles entre las medidas A y las tres medidas B ($n = 4$) para cada transecto, esto es, se estimó el LAI para cada tres medidas B con cada una de las medidas A (dos antes del transecto y dos después) y posteriormente se calculó el promedio. A su vez, se desestimó el uso del quinto anillo ya que incluirlo empeora la fiabilidad de las estimaciones en general (Bengoa, 1999; Leblanc y Chen, 2001; López-Serrano *et al.*, 2000), dado que el software C-2000 le da mayor peso que a los demás anillos.

Otro de los aspectos a tener en cuenta al usar el LAI-2000 (independientemente de su uso o no bajo condiciones de nubosidad uniforme) es el de aplicar ciertos factores correctores a las lecturas. Cuando se trabaja en bosques de coníferas, las hipótesis de partida de la metodología empleada por el equipo LAI-2000 no se cumplen generalmente (Deblonde *et al.*, 1994; Stenberg *et al.*, 1994), de manera que el LAI medido no tiene en cuenta que las acículas suelen encontrarse agru-

padas a diferentes niveles (tallos, ramas y árboles) y que hay inclusión de parte no fotosintética en las mediciones. Para salvar estos inconvenientes se suelen plantear una serie de factores correctores que fallan en su universalidad (Deblonde *et al.*, 1994), requieren estimación experimental e instrumentación adicional (Chen y Cihlar, 1996). En nuestro caso, se adoptan los resultados de estudios previos realizados sobre la misma especie en un área cercana (López Serrano *et al.*, 2000), donde se pone de manifiesto que el LAI medido por el equipo LAI-2000 se encuentra mejor correlacionado con el LAI real sin la aplicación de estos factores correctores.

Medición de la trascolación y la precipitación exterior

Para la medición de la variable hidrológica trascolación, se instalaron cuatro captadores o canalones de PVC en cada unidad experimental, resultando un total de 48. Las medidas de los captadores eran 400 cm de longitud \times 13,17 cm de ancho, con un área total de recolección por unidad experimental de 21.072 cm². La sección en «U» de éstos evita la salida de las gotas de lluvia por rebote y una pendiente del 10 % asegura la rapidez del flujo de agua hacia los puntos de salida, evitando su evaporación (Llorens *et al.*, 1997). A su vez, en los puntos de salida se dispusieron colectores de agua de 25 L de capacidad, con un embudo para la redirección del flujo.

La instalación de los captadores se llevó a cabo siguiendo un criterio sistemático: dos captadores se dispusieron con la misma dirección, a 4 m cada uno del punto central de la unidad experimental; los dos restantes se instalaron a igual distancia pero en la dirección perpendicular a la anterior.

La recogida de datos de trascolación se correspondió con el periodo inmediato a la determinación de las variables selvícolas y de índice de área foliar, que transcurrió desde el 1 de abril hasta el 6 de junio de 2009. Los datos de trascolación se corresponden con el acumulado semanal, intervalo escogido para aforar los colectores de agua. Se trata por tanto de la suma acumulada de varios eventos de precipitación durante siete días consecutivos.

La precipitación exterior se midió en un claro que se encontraba a 50 m de la zona experimental. Para su determinación, se empleó un pluviógrafo de 0,2 mm de resolución (rain collector II, Davis instruments,

USA) conectado a un datalogger externo (Onset, USA).

Tratamiento y validación de los datos

El grado de dispersión y/o ajuste entre los valores del LAI para los dos transectos antes (directos) y después de la corrección (corregidos, LAIc), así como la idoneidad del cuarto anillo del LAI-2000 para estimaciones del LAI fidedignas, se estudió mediante regresiones lineales simples. Igualmente, con los valores obtenidos en las variables ordinarias de inventario, se desarrollaron regresiones lineales entre cada una de éstas (FCC, D y G) y los valores corregidos LAIc. Las regresiones fueron realizadas por el método de mínimos cuadrados y las variables sometidas a pruebas estadísticas para verificar que cumplieran con los postulados necesarios para este análisis (normalidad e independencia de los residuos). En todos los casos se trabajó con un nivel de significación $p \leq 0,05$. Para validar los modelos, se optó por una validación externa, al ser el método más robusto (Snee, 1977), determinando nuevamente la FCC, D, G y LAIc en abril de 2010 en una masa similar separada unos 10 km de la zona de estudio, caracterizada en otro trabajo (Rojas *et al.*, 2009). Se trata de parcelas constituidas por masas coetáneas de pino carrasco repobladas hace unos 60 años y con FCC que va desde un 41% hasta un 92%. En relación a la medición del LAI, está se llevó a cabo con idéntica metodología a la descrita (incluyendo la corrección por medición con radiación directa), a excepción del número de puntos por parcela, que fue mayor (10 medidas B) como consecuencia del mayor tamaño de las parcelas (cuadradas de 100 m de lado).

Finalmente, las diferencias que provocaron las distintas intensidades de clara sobre la trascolación fueron analizadas mediante un análisis de la covarianza, ANCOVA (siendo la variable dependiente la trascolación semanal, la covariable la precipitación semanal y el factor fijo el tratamiento de clara). Para efectuar este análisis se comprobó la homogeneidad de varianzas, de las pendientes de las rectas de regresión y la normalidad de los residuos (Steel y Torrie, 1988). Las pruebas post-hoc sobre el factor ajustado por la covariable se realizaron mediante comparaciones pareadas de las medias marginales estimadas con Bonferroni al p -valor de $p \leq 0,05$. En todos los casos se trabajó con el software SPSS 16.0.

Tabla 1. Valores medios (\pm desviación estándar) de densidad (D), diámetro a la altura del pecho (DBH), área basimétrica (G) y fracción de cubida cubierta (FCC) en las parcelas experimentales de pino carrasco tras la aplicación de tres intensidades de clara más un control. Tratamientos seguidos de diferentes letras han mostrado diferencias significativas en la variable (p -valor $< 0,05$)

Tratamiento	D (pies ha ⁻¹)	DBH (cm)	G (m ² ha ⁻¹)	FCC (%)
Control_C	1.289 \pm 173,6 ^a	17,9 \pm 0,8 ^a	35,59 \pm 5,05 ^a	83,3 \pm 1,1 ^a
Baja_B	688,7 \pm 77,6 ^b	20,2 \pm 2,7 ^b	26,27 \pm 1,59 ^b	64 \pm 6,9 ^b
Moderada_M	478 \pm 15 ^b	23,2 \pm 2,2 ^b	20,88 \pm 3,76 ^b	46 \pm 5,6 ^b
Fuerte_F	177,7 \pm 33,5 ^c	23,4 \pm 3,1 ^c	8,29 \pm 0,98 ^c	16 \pm 5,3 ^c

Resultados

Caracterización silvícola y del LAI de los tratamientos

La Tabla 1 muestra los resultados de las mediciones silvícolas realizadas tras las claras, así como las correspondientes a la masa original (control). Se observa un escalonamiento gradual en los valores de las distintas variables de acuerdo a la intensidad practicada, si bien los tratamientos de intensidad baja y moderada quedan relativamente próximos en sus valores de área basimétrica y densidad. Es preciso recordar que la variable que se empleó para definir la intervención fue la cobertura y ésta ha sido la que mejor gradación presenta dentro de su rango. El criterio de eliminación en la clara ha resultado en que los árboles del control y la clara baja presenten un diámetro medio inferior.

Los resultados del LAI en condiciones de radiación difusa ofrecieron valores incoherentes (datos no mostrados), de forma que en la mayor parte de los casos las medidas tipo A resultaron menores que las medidas tipo B, lo que implicaba mayor radiación solar en las zonas con influencia de la cubierta vegetal. Sin embargo, las mediciones realizadas bajo radiación solar directa ofrecieron resultados más acordes. La Figura 1 (a-e) muestra los resultados obtenidos en estas condiciones previas a la aplicación de la corrección, enfrentado los valores del LAI entre los dos ángulos solares (transectos T1 y T2) para cada uno de los cuatro anillos por separado (Fig. 1a, b, c y d) y todos conjuntamente (Fig. 1e). Destacan los anillos 3, 4 y el conjunto de todos por el mejor comportamiento de su pendiente y su mejor ajuste a la recta 1:1. El intercepto en el origen no fue significativo para ninguno de los casos en los que el ANOVA de la regresión lineal resultó significativo. La Figura 1f muestra la corrección de los datos del cuar-

to anillo anteriores según la corrección dada en la ecuación 1, que minimiza los efectos de dispersión de la luz azul (de las soluciones válidas de la Figura 1 se ha seleccionado únicamente este anillo a fin de seguir la metodología propuesta). En el caso del transecto T1, la corrección ha supuesto un incremento medio del 19,6% ($LAI_{cT1} = 1,196 \cdot LAI_{T1}$) mientras que para T2, el incremento de los valores de LAI ha sido algo menor, del 12,7% ($LAI_{cT2} = 1,127 \cdot LAI_{T2}$), dada la mayor dispersión de la luz azul con mediciones cercanas al cénit. Esto ha hecho que los valores de LAI estimados para T1 y T2 estén ligeramente más próximos tras la corrección, con pendiente más próxima a uno (Figs. 1d y f), e intercepto casi nulo (no significativamente distinto de cero). La Tabla 2 muestra los valores medios para ambos transectos antes y después de la corrección observándose que los valores finales de LAIc se incrementan entre un 15% para el tratamiento control y un 13-14% para el resto de tratamientos.

Relaciones entre las variables silvícolas y el LAIc

El LAIc medio ha mostrado un alto grado de asociación con las diferentes variables de inventario consideradas, habiéndose obtenido modelos de regresión muy significativos en todos los casos (Tabla 3, $n = 11$); sobre todo con FCC y G, donde los interceptos no resultaron significativos. Los residuos mostraron una distribución normal y coeficientes de Durbin-Watson próximos a 2 en todos los casos. No obstante, la validación externa de estos modelos a partir de los datos obtenidos en las parcelas de validación ha dado lugar a numerosas estimaciones fuera del rango del error experimental, mostrándose sesgos más o menos pronunciados en función de la variable considerada y del ran-

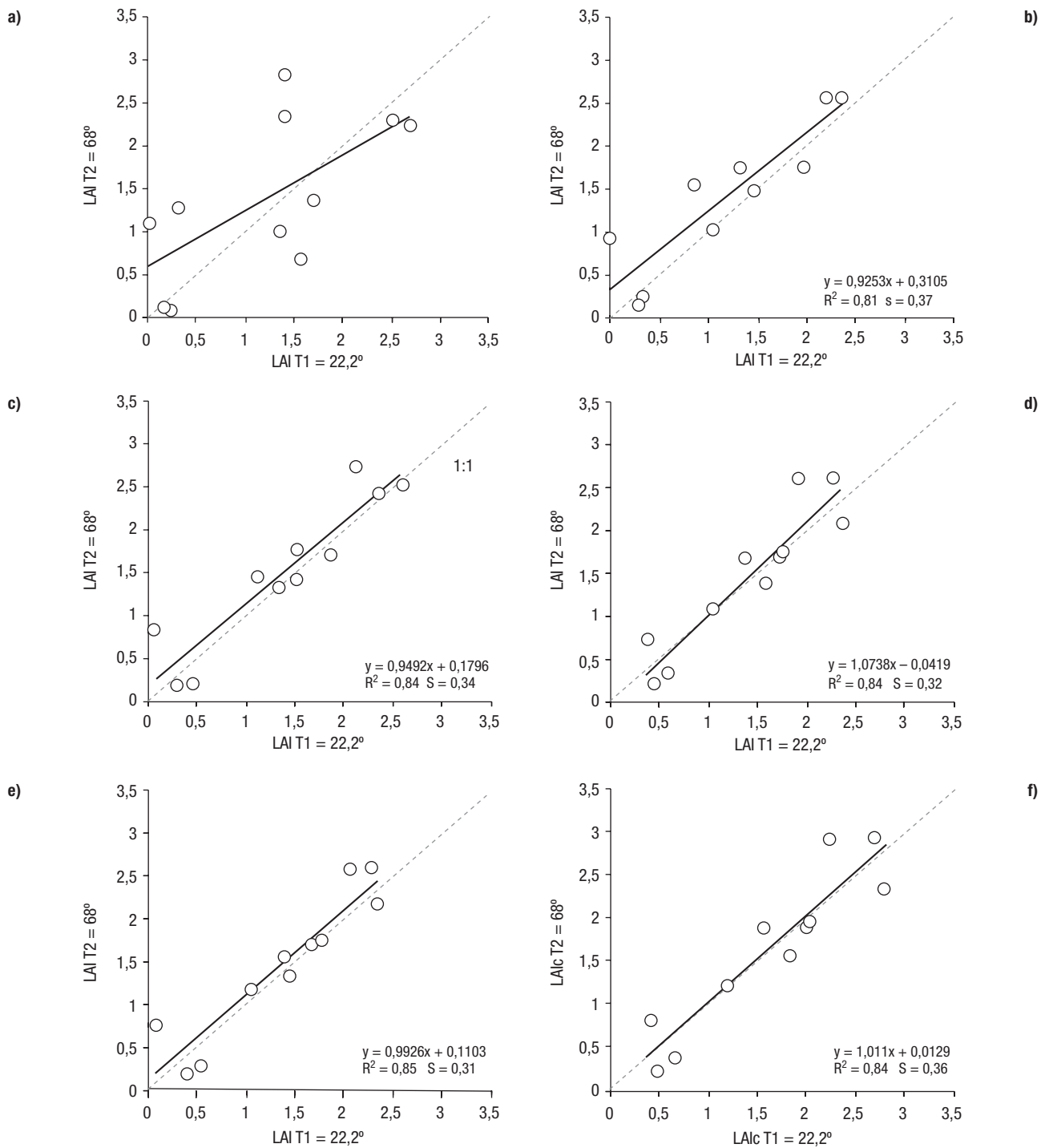


Figura 1. Gráficos de dispersión del LAI medio de cada unidad experimental según dos ángulos solares distintos (T1 y T2) para distintos anillos del LAI-2000: primer anillo (a), segundo (b), tercero (c), cuarto (d), los cuatro juntos (e) y el cuarto tras aplicar la corrección angular (f). Se representa la recta 1:1, las ecuaciones de regresión (sólo en los casos significativos), el coeficiente R² y el error estándar de la estimación (S).

go de índice de área foliar sujeto a estimación (Fig. 2d-f). Así, el mejor estimador del LAIc ha resultado ser la FCC (Tabla 3), si bien el modelo sólo ofreció esti-

maciones adecuadas en el rango de LAIc 1,5-2,5 (Fig. 2d), sobreestimando por debajo e infraestimando el valor del LAI-2000 por encima de dicho rango.

Tabla 2. Valores promedio del índice de área foliar (LAI, $m^2 m^{-2}$) tomado bajo dos ángulos solares distintos (T1 y T2) y para el cuarto anillo del LAI-2000 antes y tras la corrección angular (LAI y LAIc respectivamente) en función del tratamiento de clara y de las repeticiones o bloques considerados. Se presentan las medias para cada tratamiento con sus correspondientes desviaciones típicas y los resultados de las comparaciones post-hoc entre los valores medios de LAIc por tratamiento (p -valor $< 0,05$)

Bloque	Control_C		Baja_B		Moderada_M		Fuerte_F	
	LAI	LAIc	LAI	LAIc	LAI	LAIc	LAI	LAIc
1	2,22	2,57	1,53	1,73			0,46	0,52
2	2,44	2,81	1,75	2	1,49	1,7	0,33	0,37
3	2,26	2,58	1,71	1,96	1,07	1,21	0,55	0,62
Media	2,3 \pm 0,11	2,65 \pm 0,13 ^a	1,66 \pm 0,11	1,89 \pm 0,14 ^b	1,28 \pm 0,29	1,45 \pm 0,34 ^b	0,44 \pm 0,11	0,50 \pm 0,12 ^c

En el extremo opuesto se encuentra la densidad de arbolado, con predicciones muy alejadas del valor LAI-2000, sobre todo a partir de valores mayores de 1,5 (Fig. 2e). El área basimétrica ha presentado un comportamiento intermedio entre las dos anteriores (Fig. 2f), si bien también mostró infraestimaciones de LAI-2000 a partir de valores LAI de 1,4. Estos resultados negativos nos han llevado a reajustar los modelos obtenidos originalmente ($n = 11$) incluyendo la muestra de validación ($n = 15$), obteniendo así un modelo más representativo ($n = 26$) pero sin validación externa por el momento (Tabla 3, $n = 26$, Fig. 2a-c). En cualquier caso, los valores del coeficiente de determinación y el comportamiento de los residuos les avalan (Durbin-Watson: 1,4-1,7). En estos nuevos modelos, FCC y G aparecen nuevamente como los mejores estimadores,

si bien los errores de estimación han aumentado (Tabla 3, $n = 26$, Fig. 2a-c). Para el caso de FCC, las rectas de ambos modelos ($n = 11$ y $n = 26$) son casi coincidentes y la comparación de sus pendientes resultó ser no significativa ($p = 0,69$; análisis no mostrados), de manera que no existe diferencia entre ellos. Para el caso de G, el modelo original y el reajustado sí tienen valor de pendiente diferente ($p = 0,0002$). En el caso de la densidad, el modelo no es adecuado.

Influencia de las claras en la trascolación y su relación con las variables silvícolas y LAIc

El total de precipitación exterior recogida durante el intervalo de estudio junto con la trascolación media pa-

Tabla 3. Resumen de los modelos de regresión simple establecidos entre el índice de área foliar corregido (LAIc, $m^2 m^{-2}$) y la fracción de cabida cubierta (FCC, %), la densidad (D, $pies ha^{-1}$) y el área basimétrica (G, $m^2 ha^{-1}$) en las parcelas originales ($n = 11$) y tras ampliar la muestra a las parcelas de validación ($n = 26$). En los casos en que el intercepto no ha resultado significativo (FCC y G), se presenta también la regresión forzada por el origen

Variable dependiente	Variable predictora	R ² corregida	Error típ. estimación	ANOVA (F-valor)	Coef. B1	Error típ B1	Coef. B0	Error típ B0
<i>N = 11</i>								
LAIC	FCC	0,954	0,18603	206,5***	0,0313***	0,002	0,0489	0,124
	FCC	0,991	0,17799	1.162,4***	0,0321***	0,001		
	D	0,841	0,34426	53,9***	0,0018***	0,000	0,444*	0,193
	G	0,843	0,34199	54,8***	0,0723***	0,010	-0,019	0,247
	G	0,969	0,32455	342,6***	0,0717***	0,004		
<i>N = 26</i>								
LAIC	FCC	0,882	0,28389	187,1***	0,0341***	0,002	-0,161	0,162
	FCC	0,981	0,28381	1.376,0***	0,0318***	0,001		
	D	0,500	0,58323	26,0***	0,0019***	0,000	0,768**	0,253
	G	0,718	0,43831	64,6***	0,0794***	0,010	0,130	0,239
	G	0,957	0,43211	579,4***	0,0845***	0,004		

Significación: *, $p \leq 0,05$; **, $p \leq 0,01$; ***, $p \leq 0,001$,

ra cada tratamiento o intensidad de clara (suma de los promedios de los datos semanales de cada tratamiento) se presentan en la Figura 3. El test ANCOVA resultó ser muy significativo ($F = 20,60, p < 0,001$), indicando que

este componente del ciclo hidrológico es susceptible de modificación con la selvicultura. La comparación posterior entre pares de medias marginales reveló que las diferencias significativas se encuentran entre todos los

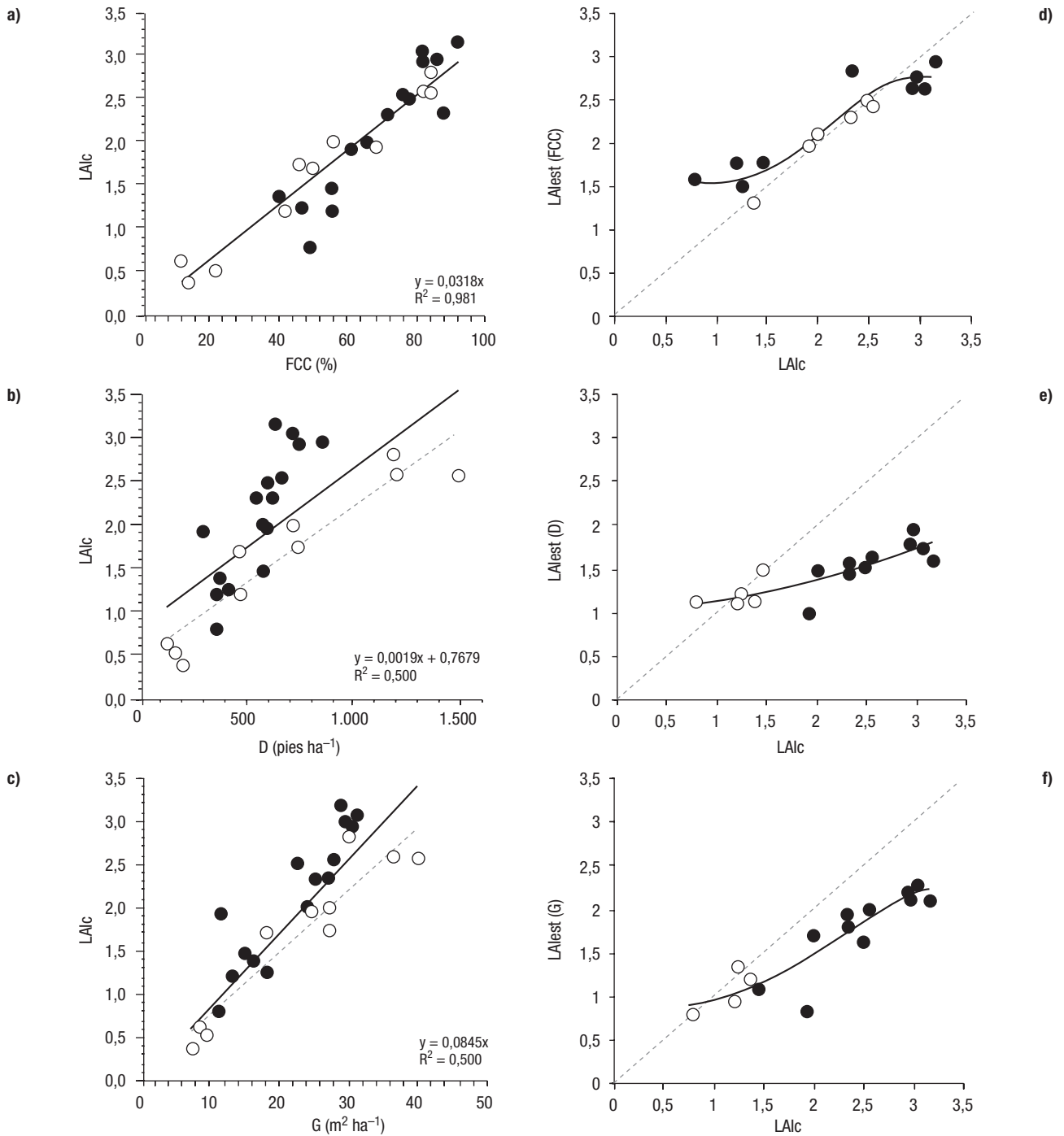


Figura 2. Gráficas a-c: representación de las regresiones entre el LAIc (m² m⁻²) y FCC (%), D (pies ha⁻¹) y G (m² ha⁻¹) según el modelo original (n=11, puntos vacíos, línea discontinua) y el final tras incorporar los datos de validación (n=26, puntos vacíos y sólidos, línea continua, ecuación y R² representadas). Gráficas d-f: resultados de la validación externa de los modelos originales LAI=f(FCC, D ó G), n=11, con indicación de los valores estimados fuera del error típico de estimación (puntos sombreados).

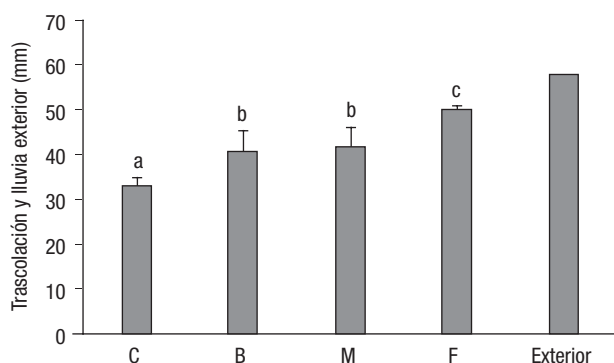


Figura 3. Valores de trascolación media (y desviación típica) para las diferentes intensidades de clara (Control, C; Intensidad Baja, B; Intensidad Media, M; Intensidad Fuerte, F) junto con la precipitación exterior para todo el periodo (1 abril-6 junio 2009). Tratamientos con diferentes letras han mostrado diferencias significativas entre ellos (p -valor $< 0,05$).

tratamientos ($p < 0,005$), con la excepción de aquellos de intensidad moderada (M) y baja (B), que resultaron indiferentes en términos de trascolación producida, tal y como se aprecia en la Figura 3, con valores muy cercanos, en torno a 41 mm (70,6% con respecto a la precipitación incidente). A su vez, las diferencias más notables se encontraron entre el tratamiento más intenso y el control, con un 29,13% menos de precipitación alcanzando el suelo para el tratamiento control, como consecuencia de una mayor interceptación de la lluvia.

Las relaciones entre la trascolación media por tratamiento y las variables de inventario y LAIc de la masa han generado modelos de regresión lineal muy significativos en todos los casos ($p < 0,001$) (Fig. 4). La estimación de la lluvia trascolada ha mejorado desde el LAIc ($R^2 = 0,69$; $S = 3,95$ mm) hasta el área basimétrica ($R^2 = 0,81$; $S = 3,01$ mm), con la cobertura y la

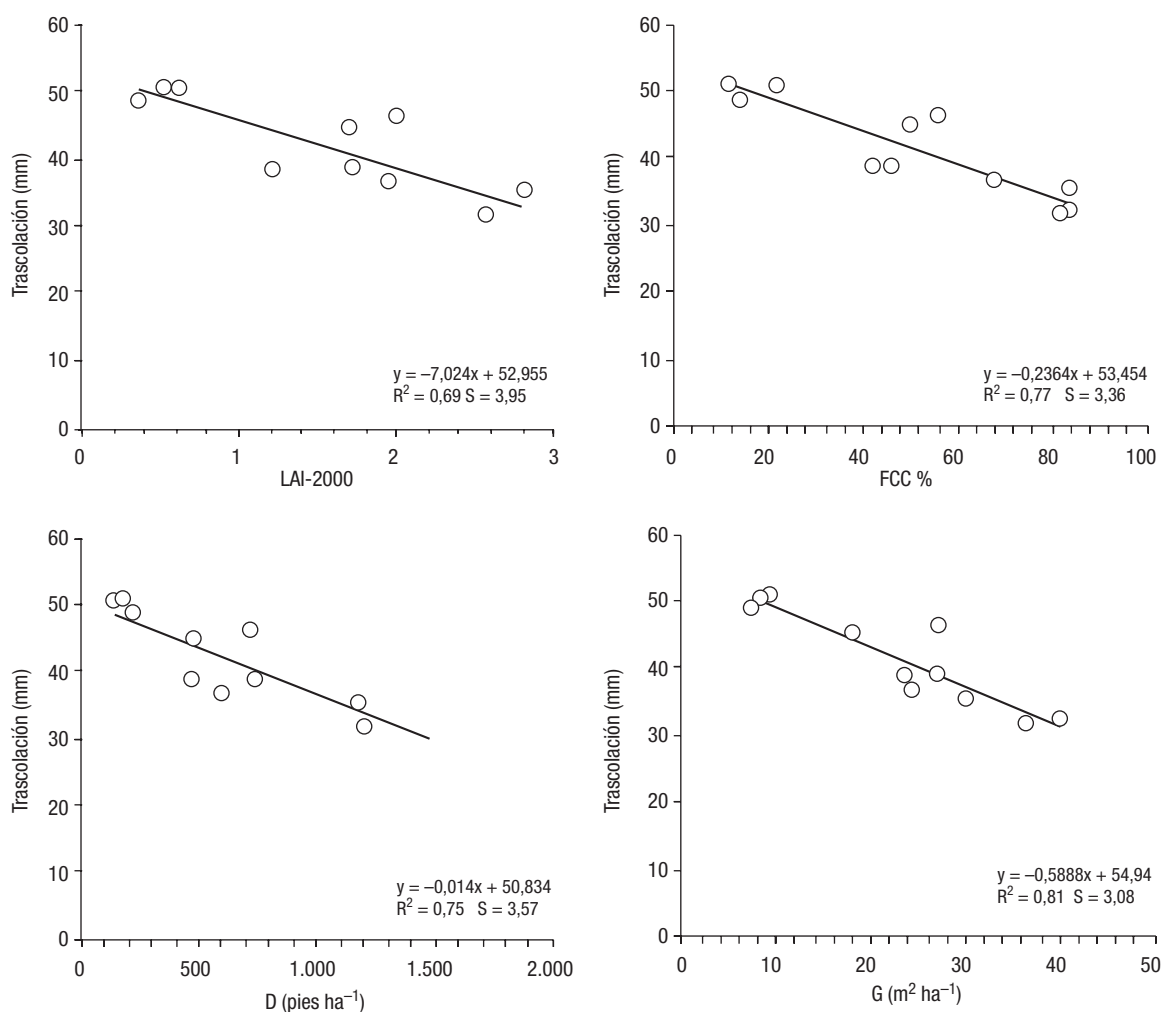


Figura 4. Representación gráfica de los modelos lineales obtenidos entre la trascolación media y LAIc ($m^2 m^{-2}$), FCC (%), D (pies ha^{-1}) y G ($m^2 ha^{-1}$). Se representan las ecuaciones de regresión, el coeficiente R^2 y el error estándar de la estimación (S).

densidad dando valores intermedios (Fig. 4). En todos los casos los residuos mostraron distribución normal e independencia.

Discusión

Determinación del LAI bajo radiación solar directa

Las estimaciones del índice de área foliar con el empleo de un solo sensor LAI-2000 bajo condiciones de radiación difusa no han resultado coherentes. Ello es probablemente debido a que las medidas A y B no son instantáneas en el tiempo, lo que hace que la variación de luminosidad en el estado del cielo afecte significativamente a los resultados. Esto pone de manifiesto que, de seguir las indicaciones de uso del aparato, se hace indispensable el empleo simultáneo de dos sensores y dos operarios intercomunicados (López-Serrano *et al.*, 2000). Aún así, en climas con predominio de días despejados como el imperante en el este peninsular, la baja frecuencia días de nubosidad uniforme y su difícil pronóstico, hace que el procedimiento sea poco operativo a efectos prácticos. Como alternativa, las lecturas bajo radiación solar directa pueden ser corregidas de manera que se soslayan los problemas relacionados con los fenómenos de dispersión de la luz azul y por tanto la infraestimación del LAI. Los resultados obtenidos en este trabajo prueban que el LAI obtenido en estas condiciones, una vez corregido, es independiente del ángulo solar (y por tanto de la dispersión de la luz azul), lo que demuestra la validez de la corrección propuesta por Leblanc y Chen (2001) fuera de su ámbito.

Esta corrección ha aumentado el valor del LAI como era de esperar pero, dado que no se ha realizado una medición directa de esta variable, no hay posibilidad de saber cuan cerca o lejos están nuestros valores respecto del LAI real, máxime teniendo en cuenta que no se han aplicado los factores correctores por agrupamiento y tejido no fotosintético. Sin embargo, la bibliografía disponible permite despejar dudas en este sentido. Trabajos realizados con la especie en zonas próximas con LAI-2000 (López-Serrano *et al.*, 2000) han establecido una relación entre área basimétrica y LAI real (obtenido por el método destructivo) dada por la ecuación $LAI_{real} = 792 G$ (ambas variables en $m^2 ha^{-1}$). Al comparar el LAI real con el LAI estimado por el LAI-2000 con y sin coeficientes co-

rectores, estos autores encontraron mucho mejor ajuste en el segundo caso, con una relación entre G y LAI muy próxima a la anterior: $LAI_{LAI-2000 + Fac.corr.} = 1432 G$ frente a $LAI_{LAI-2000} = 771 G$. La relación obtenida en el presente trabajo ($LAI_c = 845 G$, Tabla 3) se aproxima bastante más a la propuesta en el trabajo citado cuando no se consideran factores correctores, ofreciendo valores un 6,3% superiores a la ecuación para LAI real o un 8,9% superiores a la de LAI estimado presentadas anteriormente. En este contexto, parecería razonable la no necesidad, ya apuntada en el trabajo citado, de aplicar factores para corregir el agrupamiento de las acículas en las ramas y la elevada proporción de tejido no fotosintético en este tipo de masas. La explicación de estos hechos tiene que ver probablemente con la autocompensación de distintos tipos de errores. Así, si el agrupamiento de las estructuras vegetales origina una infraestimación del LAI real y una elevada proporción de tejido no fotosintético una sobreestimación del mismo (Stenberg, 1996), en nuestro caso, los resultados se explicarían por el amplio rango de cobertura manejado experimentalmente donde, por un lado se infraestima el LAI en las unidades experimentales de menor cobertura (agrupamiento de las ramas y hojas, así como de los árboles) y, por otro lado, se sobreestima en las de mayor (altas proporciones de tejido no fotosintético).

Relación entre variables silvícolas y LAIc

La aplicación de las claras a diferentes intensidades ha supuesto una reducción cuantitativa constante para todas las variables dasométricas estudiadas así como para el LAIc, habiendo fuertes correlaciones positivas entre ellas. La obtención del índice de área foliar a partir de otra información más disponible o fácil de obtener ha dado lugar a numerosos estudios donde se han encontrado relaciones significativas entre el $LAI_{LAI-2000}$ y la biomasa leñosa, la densidad (Baynes y Dunn, 1997; López-Serrano *et al.*, 2000) y con imágenes satélite y LIDAR (Cifuentes Sánchez y Navarro Cerrillo, 1999; Navarro *et al.*, 2010). Respecto a las variables consideradas en este estudio, Davi *et al.* (2008) encontraron proporcionalidad entre LAI y G un año después de la aplicación de claras en masas de *Pinus nigra* subsp. *nigra*. De todas las variables dasométricas estudiadas en este trabajo, la FCC ha sido la mejor variable predictiva del LAI ($R^2 = 88\%$), resultados coincidentes con los presentados por López-Se-

rrano *et al.* (2000). A su vez, la relación entre ésta y el LAI ha sido la única que ha permanecido relativamente invariable en parcelas aledañas, por lo que podría confirmarse que la FCC sea la mejor variable para estimar el LAI en pino carrasco y viceversa. Sin embargo, es posible que la proporcionalidad de las relaciones entre las variables dasométricas y el LAIc aquí presentadas no se mantengan en el tiempo en las espesuras altas, ya que una vez se alcanza la tangencia de copas (FCC ~ 70 %), el incremento de LAI con respecto a la variable considerada (pendiente de la recta) será presumiblemente menor, tendiendo a una asíntota (McDowell *et al.*, 2007). En un estudio del efecto del clareo en la trascolación de pino canario nueve años después de la aplicación de los tratamientos, Aboal *et al.* (2000), observaron que los tratamientos menos intensos superaban en LAI al control, de manera que transcurrido un lapso temporal, la proporcionalidad inicial se pierde.

Relación entre trascolación y las variables silvícolas y LAIc

La trascolación es una de las variables hidrológicas más susceptibles de modificación cuando se aplican tratamientos de reducción de la densidad en masas forestales (Crockford y Richardson, 2000). Ésta es una de las razones de la aplicación de la selvicultura de producción/ahorro de agua que se ha desarrollado en varias zonas del globo durante las últimas décadas y que puede tener un papel relevante dentro de las nuevas condiciones de selvicultura adaptativa. En el presente estudio, la aplicación de distintas intensidades de claras ha significado un incremento progresivo de la cantidad de lluvia que ha alcanzado el suelo (trascolación), como consecuencia de una menor intercepción de la misma por parte de la estructura forestal. Si bien el lapso temporal es insuficiente para ir más allá en estas consideraciones, los resultados concuerdan con las tendencias generales obtenidas en coníferas mediterráneas y en concreto en la especie considerada (Llorens y Domingo, 2007). En cualquier caso, el objetivo planteado aquí se centra más en el establecimiento de relaciones predictivas entre LAIc y trascolación tal y como se ha obtenido en los resultados. En este sentido, el LAIc se comporta como un buen estimador de la trascolación al tener en cuenta, además de las dimensiones x e y de la estructura forestal, la z (y por tanto el volumen), y con ello dar un

valor más realista de la capacidad interceptadora de la lluvia por parte del dosel arbóreo. No obstante, los resultados obtenidos ponen de manifiesto que los modelos presentan similares potencias predictivas para las variables tradicionales, de manera que no puede decirse que el LAI sea la mejor variable para la estimación de la trascolación en este caso. En cualquier caso el grado de explicación es mayor al de otros estudios (Aboal *et al.*, 2000) y debe tenerse presente el corto intervalo de tiempo considerado. Además, es factible pensar en que el estado de gestión deficitaria de la masa haya dado lugar a un desarrollo de copa verde deficiente, haciendo que el LAIc no presente mayor potencia de estimación que las otras variables de masa estudiadas.

Conclusiones

El presente trabajo marca un avance importante en la simplificación del uso y sistematización del sensor LAI-2000 en masas como las aquí estudiadas, al verificar que es aplicable la corrección angular de los valores obtenidos bajo condiciones de radiación directa. Ello supone una mayor versatilidad en las mediciones, que pueden llevarse a cabo con mayor independencia de las condiciones meteorológicas, bajo diferentes ángulos solares (en este trabajo se ha cubierto el 51% del ángulo cenital total posible: 0-90°) y con un único sensor (y operador). Así, los valores de LAI estimados presentan coherencia con la bibliografía y las estructuras forestales generadas como consecuencia de los clareos.

La aplicación de claras a distintas intensidades ha generado un gradiente de LAIc, FCC, D y G en la masa tratada que ha permitido establecer diferentes relaciones entre estas variables, especialmente entre la FCC y el LAIc, que han mostrado la correlación más fuerte. La importancia de estas relaciones trasciende más allá del presente trabajo, pues evidencia la posibilidad de inter-conversión entre ellas, haciendo más versátil el uso de distintas variables caracterizadoras de la estructura y función de los ecosistemas forestales y por tanto mejorando la información de base para una gestión forestal adaptativa. A pesar de ello, son necesarios más estudios que caractericen estas relaciones para lapsos temporales mayores con respecto a la aplicación del clareo, ya que la dinámica de la estructura forestal hará probablemente que estas relaciones se modifiquen.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino a través del convenio 20071160 (*Determinación de los factores hidrológicos y de recuperación de la cubierta forestal del monte mediterráneo y su percepción social*). Los autores desean agradecer especialmente el apoyo de la Consellería de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda de la Generalitat Valenciana, y en especial a Javier Hermoso, Rafael Landete y todo el personal del monte público La Hundede. Manuel Franco colaboró estrechamente en el trabajo de campo. Se agradecen también los comentarios sugeridos por los revisores anónimos, los cuales mejoraron significativamente el manuscrito.

Referencias bibliográficas

- ABOAL J.R., JIMÉNEZ 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.
- ALCAMO J., MORENO J.M., NOVÁKY B., BINDI M., CORBOV R., DEVOY R.J.N., GIANNAKOPOULOS C., MARTIN E., OLESEN J.E., SHVIDENKO A., 2007. Europe. *Climate Change 2007: impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., Van der Linden P.J., Hanson C.E., eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 5pp. 41-580.
- ARIAS D., CALVO-ALVARADO J., DOHRENBUSCH A., 2007. Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. *For Ecol Manage* 247(1-3), 185-193.
- ASNER G.P., SCURLOCK J.M., HICKE J.A., 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecol Biogeogr* 12, 91-205.
- BAYNES J., DUNN G.M., 1997. Estimating foliage surface area index in 8-year-old-stands of *Pinus elliotti* var. *elliotti* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* of variable quality. *Can J For Res* 27, 1367-1375.
- BENGOA J.L., 1999. Estimación de la estructura foliar en masas forestales: fundamentos teóricos y análisis de la coherencia y fiabilidad de las mediciones mediante la aplicación informática TDL 2.0. *Invest Agrar: Sist Recur For* 8(2), 423-445.
- CESCATTI A., 1998. Effects of needle clumping in shoots and crowns on the radiative regime of a Norway spruce canopy. *Annales des Sciences Forestieres* 55, 89-102.
- CHEN J.M., BLACK T.A., 1992. Defining leaf area index for non flat leaves. *Plant Cell Environ* 15, 421-429.
- CHEN J.M., CIHLAR J., 1996. Retrieving Leaf Area Index of boreal conifers forests using Landsat images. *Remote Sens Environ* 55, 153-162.
- CIFUENTES SÁNCHEZ V.J., NAVARRO CERRILLO R.M., 1999. Determinación del índice de superficie foliar (leaf area index) en masas forestales usando imágenes landsat-tm. Conclusiones de un primer estudio en la sierra norte de Córdoba. *Mapping*, 58. Disponible en: www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=696 [31 May-2010].
- CROCKFORD R.H., RICHARDSON P.D., 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrol Process* 14, 2903-2920.
- DAVI H., BARET F., HUC R., DUFR NE E., 2008. Effect of thinning on LAI variance in heterogeneous forests. *For Ecol Manage* 256, 890-899.
- DEBLONDE G., PENNER ., ROYER A., 1994. Measuring Leaf Area Index with the LI-COR LAI-2000 in pine stands. *Ecology* 75(5), 1507-1511.
- GRIER C.C., RUNNING S.W., 1977. Leaf area of mature Northwestern coniferous forests: relation to site water balance. *Ecology* 58, 893-899.
- HANSSSEN K.H., SOLBERG S., 2007. Assessment of defoliation during a pine sawfly outbreak: calibration of airborne laser scanning data with hemispherical photography. *For Ecol Manage* 250, 9-16.
- KEENAN T., GARCÍA R., FRIEND A.D., ZAEHLE S., GRACIA C., SABATE S. 2009. Improved understanding of drought controls on seasonal variation in Mediterranean forest canopy CO₂ and water fluxes through combined in situ measurements and ecosystem modeling. *Biogeosciences Discuss* 6, 2285-2329.
- KIMMINS J.P., 2004. *Forest ecology: a foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry*, 3rd e. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 596 pp.
- KOZLOWSKI T.T., KRAMER P.J., PALLARDY S.G., 1991. *The physiological ecology of woody plants*. Academic Press. 657 pp.
- LANDSBERG J.J., WARING R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For Ecol Manage* 95, 209-228.
- LEBLANC S., CHEN J.M., 2001. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agric For Meteorol* 110, 125-139.
- LI-COR, 1991. *LAI-2000 Plant Canopy Analyser Operating Manual*. Lincoln, Nebraska, EE.UU. LI-COR Inc.
- 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. *J Hydrol* 199, 331-345.
- LLORENS P., DOMINGO F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *J Hydrol* 335, 37-54.
- LÓPEZ SERRANO F.R., LANDETE CASTILLEJOS T., MARTÍNEZ MILÁN J., CERRO BARJA A., 2000. LAI

- estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique. *Agric For Meteorol* 101, 95-111.
- McDOWELL N.T., ADAMS H.D., BAILEY J.D., KOLB T.E., 2007. The role of stand density on growth efficiency, leaf area index, and resin flow in southwestern ponderosa pine forests. *Can J For Res* 37, 343-355.
- MONSI M., SAEKI T., 1953. Über den linchtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. *Japanese J Bot* 14, 22-52.
- NAVARRO CERRILLO R.M., SÁNCHEZ DE LA ORDEN M., GÓMEZ BONILLA J., GARCÍA-FERRERA A., HERNÁNDEZ CLEMENTE R., LANJERI S., 2010. Aplicación de imágenes LIDAR para la estimación del índice de superficie foliar (LAI) en encinas [*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.]. *Forest Systems* 19(1), 61-69.
- OLTHOF I., KING D.J., LAUTENSCHLAGER R.A., 2003. Overstory and understory leaf area index as indicators of forest response to ice storm damage. *Ecological Indicators* 3(1), 49-64.
- ROJAS E., JOVANI A.J., PÓVEDA J.A., 2009. Establecimiento de red de parcelas permanentes de masas coetáneas de *Pinus halepensis* Mill. en la Comunidad Valenciana. 5° CFE. [CD-ROM] 01-159.
- SABATÉ S., GRACIA C.A., SÁNCHEZ A., 2002. Likely effects of climate on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *For Ecol Manag* 162, 23-37.
- SAURA S., VEGA C., PIQUÉ M., LOBO A., PACUAL L. (ed.), 2005. Actas de la I reunión de inventario y teledetección forestal, Lleida 25-26 mar-04. *Cuad Soc Esp Cienc For* 19.
- SNEE R.D., 1977. Validation of regression models: methods and examples, *Technometrics* 19, 415-428.
- STEEL R.G.D., TORRIE J.H., 1988. *Bioestadística: principios y procedimientos*, 2ª ed. McGraw Hill. 622 pp.
- STENBERG P., 1996. Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers. *Agric For Meteorol* 79, 1-8.
- STENBERG P., LINDER S., SMOLANDER H., FLOWER-ELLIS J., 1994. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some scots pine stands. *Tree Physiol* 14, 981-995.
- VOSE J.M., SWANK W.T. 1990. A conceptual model of forest growth emphasizing stand leaf area (Chap 24). In: *Process modeling of forest growth responses to environmental stress* (Dixon R.K., Meldahl R.S., Ruark G.A., Warren W.G., eds). Timber Press, Inc, Portland, OR. pp. 278-287. Available: <http://coweeta.uga.edu/publications/336.pdf> [31 may, 2010].