

# ESTIMACIÓN DIRECTA DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (LAI) EN ARBOLES INDIVIDUALES DE *Pinus halepensis* Mill.

LOPEZ-SERRANO, F.R \*; MOROTE, F.A.G. \*; BARRERO, J.J \*; LANDETE, T \*. & ANDRES, M. \*

\* DEPT. DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROFORESTAL DE LA E.T.S.I. AGRÓNOMOS DE ALBACETE

## RESUMEN

En este trabajo se ha realizado la estimación directa del área foliar y del índice de área foliar, LAI, en 12 pies de *Pinus halepensis* Mill., en un pinar de la provincia de Albacete. La estimación directa se realizó mediante ensayo destructivo de los 12 pies, dividiendo la copa viva de los árboles en tres secciones de igual longitud. Los resultados obtenidos sobre valores del LAI para pies individuales de esta especie son los primeros que se conocen. Se propone un modelo, a través de relaciones alométricas, para estimar el área foliar de árboles individuales que permitirán estimar el LAI de masas naturales de pino carrasco. Se comprueba que el LAI, estimado de forma directa, depende conjuntamente de parámetros dendrométricos (altura total, longitud relativa de la copa) y de parámetros dasométricos (fracción de cubierta cubierta). Se propone un modelo de estimación del LAI a través de estos parámetros.

P.C.: Índice de Área Foliar, Área foliar, *Pinus halepensis*, Relaciones alométricas.

## SUMMARY

Direct estimates of leaf area and leaf area index (LAI) were carried out for 12 Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) individual trees, in a pine stand from Albacete (Spain). The estimates were obtained using destructive sampling: the length of the live crown was divided into equal thirds. These results are the first fruits known in relation to LAI measurements in Aleppo pine individual trees. Models are presented, using allometric equations, to estimate leaf area of individual trees that allow to calculate the LAI-direct for Aleppo pine stands. We observed that direct estimates of LAI were very correlate at one time with dendrometric (total height, relative length of crown) and forest mensuration (crown cover fraction) parameters. A model for direct estimates of LAI is proposed using these parameters.

K.W.: Leaf area index, leaf area, *Pinus halepensis*, allometric relationships

## INTRODUCCIÓN

En los estudios de interrelación entre plantas y medio-ambiente, tiene una relevante importancia la denominada "estructura de la cubierta". Se define como la cantidad y organización del material vegetal por encima del nivel del suelo (Norman y Campbell, 1989) o, también como el conjunto de rasgos que describen la forma, tamaño y geometría de una planta o comunidad (Ross, 1981). En la práctica las descripciones de la estructura de la cubierta se reducen a dar unos pocos parámetros, algunos de los cuales son fácilmente medibles (p.e. parámetros dendrométricos y dasométricos en el campo forestal) y otros más difíciles y costosos de medir (cantidad de follaje y orientación del mismo). La cantidad de follaje (superficie de follaje) referida a la unidad de superficie del terreno (Índice de Área Foliar) es el parámetro más utilizado puesto que informa de procesos clave en los ecosistemas: flujo de CO<sub>2</sub>

y vapor de agua (Jarvis y Stewart, 1979; Seller et al, 1986), intercepción de lluvia y producción de agua en la cuenca (Vertessy, 1995), detección prematura de estrés natural y antropogénico en ecosistemas forestales (Waring, 1985), como indicador de productividad y de crecimiento del tronco (Waring et al, 1981; Waring et al, 1996) y también en la determinación de índices de vegetación a través de sensores remotos en satélites (Chen y Cihlar, 1996).

Existen distintos procedimientos para estimar el Índice de Área Foliar (LAI), tanto directos (Daughtry, 1990) como indirectos (Welles, 1990; Welles y Cohen, 1996; ver revisión en Ross, 1981 y en Norman y Campbell, 1989). En general los procedimientos directos, que permiten obtener gran exactitud en las estimaciones, son lentos y costosos, aunque imprescindibles para validar los denominados procedimientos indirectos.

Distintos métodos directos permiten estimar el área y ángulo del follaje; la elección de un método u otro depende de las características morfológicas de los elementos de la planta, de la exactitud requerida en la estimación, del presupuesto disponible, etc. (Daughtry, 1990).

Los objetivos a conseguir en este trabajo serán: i) Informar de los valores del LAI de pies individuales, estimados con procedimientos directos. ii) Proponer un método de estimación del LAI individual a través de parámetros dendrométricos fácilmente medibles. iii) Proponer un modelo, a través de relaciones alométricas, que estime el área foliar de pies individuales, para que en estudios posteriores se pueda aplicar a masas forestales y así estimar su LAI.

## METODOLOGÍA

El estudio fue realizado en el monte "Casa Molina" situado en el extremo norte del término municipal de la ciudad de Albacete (coord. UTM 4336, 591), durante los meses de marzo a abril de 1996. Se trata de una masa forestal natural mixta, donde generalmente predomina el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.), con algún pie de pino piñonero (*Pinus pinea* L.) y de encina (*Quercus rotundifolia* L.), estando formado el sotobosque por *Quercus coccifera*, *Rosmarinus officinales*, *Thymus vulgaris*, *Juniperus oxycedrus*, *Rhamnus lycioides*, *Cistus clussi*,...; en algunos rodales predomina el pino piñonero frente al carrasco. La serie climatofila corresponde a la Mesomediterránea Manchega y aragonesa basófila de Encina -*Bupleuro rigidi Querceto rotundifoliae Sigmatum* - (Rivas-Martínez, 1987). La temperatura media anual es de 13,6° y la precipitación total anual de 352,6 mm, presentando un subtipo fitoclimático IV(VI)1(7): Mediterráneo Subnemoral, fresco, semiárido de meseta (Allue, 1990).

La densidad media de pies por ha es de 804±103 (media±SE), presentando una forma principal de masa regular, pero con elevado número de pies jóvenes a consecuencia de cortas por entresaca realizadas hace 15-20 años. El área basimétrica (m<sup>2</sup>/ha) es de 13,06±1,43, la altura total media (m) es de 7,09±0,29 y la fracción de cabida cubierta (porcentaje), incluyendo el posible solapamiento de copas, es de 39,38±3,83.

Se define el LAI de un pie como la razón entre la superficie proyectada de todas las acículas y la superficie de la proyección de su copa (DLLAI según Welles, 1990; Le Goff y Ottorini, 1996). Doce árboles de pino carrasco, representativos de las categorías dimensionales existentes en la masa (clases diamétricas entre 10 y 35 cm), se seleccionaron para ser cortados.

Antes de ser cortados se marcó la altura normal y se midió con detalle el diámetro normal y la proyección de la copa utilizando una pértiga con plomada para señalar ocho radios característicos del contorno de la misma (Fig. 1). Una vez cortado el árbol, se midió la profundidad de la copa, Pc, definida como la diferencia entre la altura total del pie y la altura del primer verticilo vivo de la copa (se considera primer verticilo vivo aquel más próximo al suelo y que posee más de la mitad de sus ramas vivas), dividiéndose en tres secciones de igual longitud, para posteriormente poder realizar el muestreo de ramas que permitió la estimación del área foliar (Monsi y Saeki, 1953; Ross, 1981; Norman y Cambell, 1989; Gower y Norman,

1991). Esta estimación se realizó a través de la estrecha relación existente entre área y biomasa foliar (Ross, 1981; Daughtry, 1990). En cada sección se cortaron todas las ramas y se pesaron en fresco ( $P_i$ ), con una precisión de 0,05 kg, seleccionándose tres ramas representativas que también fueron pesadas individualmente.

De cada una de las 9 ramas seleccionadas por árbol se cortaron y pesaron con precisión todos los ramillos. Además se cortó en sólo una rama por sección, una rodaja de la zona de inserción de la rama con el tronco.

El tronco del árbol fue troceado y pesado en fresco, en trozas de 1 m de longitud. De la parte inferior de cada troza se cortó una rodaja de 2 cm de espesor. Todo ello se guardó, perfectamente identificado, en bolsas de plástico para ser llevadas al laboratorio.

Para estimar el área foliar, se realizaron dos submuestreos en cada una de las 9 ramas seleccionadas. Los submuestreos fueron aleatorios para calcular estimadores de razón. El primer submuestreo de cada rama consistió en seleccionar 20 ramillos del total para calcular la proporción de peso fresco de acículas respecto al peso total fresco del ramillo, lo que permitió estimar el peso fresco de acículas en la rama; previamente se comprobó que la proporción era constante para garantizar la bondad del estimador de razón. Las mismas acículas separadas del eje del ramillo fueron secadas en estufa (85° C, 24 horas) para calcular su humedad y poder estimar el factor "q" (peso seco de acículas en una rama/peso total fresco de la rama). El segundo submuestreo se realizó para estimar el "SLA" (área específica de las hojas), que se define como el área proyectada de las acículas en fresco por gramo de peso seco de acículas. Consistió en elegir aleatoriamente 2 gr de acículas frescas de las cuales se midió la superficie proyectada, mediante escaneado y tratamiento digital de imágenes. Previamente se comprobó que el SLA era constante en función del tamaño o edad de las acículas.

Para cada sección,  $i$ , se calculó un  $q_i$  medio y un  $SLA_i$  medio, con lo que el área foliar por sección ( $A_i$ ) ( $cm^2$ ) y el área foliar total ( $A$ ) del pie serán:

$$A_i = P_i * q_i * SLA_i \quad A = \sum A_i$$

De cada rodaja de las trozas del tronco se midieron los diámetros (con y sin corteza), el área de albura, el área de la rodaja, el número de anillos, crecimientos, etc., para poder realizar un análisis de tronco utilizando el software TDIF 2.0 (Bengoa, 1996). Tras la determinación de la humedad de cada rodaja (105 °C, 48 horas), se calculó la biomasa seca del tronco y del fuste (7 cm en punta delgada). Con las rodajas de las ramas y tras su secado, se cuantificó la humedad y se estimó la biomasa seca de las mismas.

Además, dentro de un círculo de 10 m de radio con centro en cada árbol seleccionado, se localizaron todos los pies mediante coordenadas polares y se les midió el diámetro normal (Fig. 2).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características dendrométricas y las estimaciones directas del LAI, LAI-D, se muestran en la tabla 1. El LAI medio de los 12 pies es de 2,66, siendo el mínimo de 1,82 y el máximo de 3,69. No hay publicados datos de LAI de pies aislados de pino carrasco, aunque podemos afirmar que los resultados están dentro de lo esperado en comparación con otras especies similares. Ej, en plantaciones de *Pinus resinosa* Ait. (850 pies/ha) y de *Pinus banksiana* Lamb. (781 pies/ha) se dan valores del LAI de la masa de 4,9 y 2,0 respectivamente (Deblonde, 1994).

No existe una estrecha dependencia lineal del LAI-D con ningún parámetro dendrométrico, aunque sí se observa una significativa tendencia decreciente del LAI-D conforme aumenta la altura total del árbol,  $H_t$ , ( $R^2=48\%$ ;  $SE=0,53$ ;  $p<0,001$ ), y creciente conforme aumenta la longitud relativa de la copa,  $Lrc$ , definida como la profundidad de copa dividida por la altura

total del árbol ( $R^2=96,6\%$ ;  $SEE=0,53$ ;  $p<0,001$ ). Le Goff y Ottorini, 1996, en un estudio del LAI en pies de *Fraxinus excelsior*, obtienen este mismo resultado, aunque indican que para Lrc mayores de 0,45 el LAI-D comienza a decrecer levemente.

Tampoco se observa fuerte dependencia lineal del LAI-D con parámetros dasométricos (fracción de cabida cubierta -Fcc-, número de pies por ha -N-, área basimétrica por ha -G-, relación de espaciamiento - $Re = \sqrt{((Fcc*\pi)/(G*4))}$ -), aunque también se intuye cierta dependencia que provoca un aumento del LAI-D al aumentar la relación de espaciamiento ( $R^2=96\%$ ;  $SEE=0,57$ ;  $p<0,01$ ) o al aumentar la fracción de cabida cubierta ( $R^2=92,6\%$ ;  $SEE=0,78$ ;  $p<0,001$ ). Este resultado concuerda con el obtenido en una masa de *Picea abies* (Moser et al, 1994).

Los SEE son a veces tan elevados (casi el 30% sobre el valor medio) que no se puede afirmar que existan relaciones estrechas entre variables para poder ser utilizadas en la estimación del LAI-D. No obstante, se propone un modelo de estimación del LAI-D donde intervienen conjuntamente parámetros dendrométricos y dasométricos (densidad de masa), con un SEE relativo del 6%, que sí podría utilizarse como modelo predictor del LAI-D (Fig. 3):

$$LAI-D = 0,035Fcc + 3,732Lrc - 0,075Ht$$

$R^2=99,68\%$ ;  $SEE=0,16$ ;  $n=12$ ;  $p<0,001$ , donde Fcc(%) incluye el posible solape de las copas puesto que se calcula por suma de la superficie de todas las copas en la parcela, Ht(m).

El resultado obtenido concuerda razonablemente bien con la naturaleza del parámetro LAI, puesto que este no sólo depende del árbol en cuestión sino de la competencia con sus vecinos. Por ello es razonable que en el modelo, además de incluir parámetros típicamente dendrométricos, intervenga un parámetro indicador de competencia entre individuos.

Uno de los procedimientos más utilizados para estimar el LAI-D de una masa forestal es utilizar la relación alométrica existente entre área foliar, LA, y algún parámetro dendrométrico del árbol. De acuerdo con Shinozaki et al, 1964I-II y Waring et al, 1982, el parámetro más correlacionado con el área foliar es el área de albura en la base de la copa viva ( $R^2=94,08\%$ ;  $SEE=9,99$ ;  $p<0,001$ ;  $n=12$ ), aunque la diferencia encontrada utilizando otros parámetros como son el área basimétrica normal sin corteza o el diámetro normal sin corteza, dsc, al cuadrado, no es importante. Esto se justifica por que los pies son relativamente jóvenes y no ha habido suficiente tiempo para que la formación de duramen de lugar a discrepancias importantes en la proporción de áreas de albura a áreas totales, en la base de la copa o a la altura normal. Por ello proponemos, por la facilidad de aplicación, la siguiente relación alométrica (Fig. 4):

$$LA = 0,178 dsc^{1,787}$$

$$R^2 = 92,33\%; SEE = 0,25; p<0,001; n=12) LA(m^2); dsc(cm)$$

## CONCLUSIONES

i) Los valores del LAI para pino carrasco están dentro de lo esperado en relación a los valores obtenidos en otras especies de coníferas.

ii) El LAI de un pie de pino carrasco depende de la altura total del mismo, de la longitud relativa de su copa y de la fracción de cabida cubierta -incluyendo solapes- de la masa circundante.

iii) No se pueden dar ecuaciones predictoras del LAI-D utilizando únicamente parámetros dendrométricos. Se propone el siguiente modelo de regresión lineal múltiple, sin constante, altamente significativo, donde intervienen parámetros dendrométricos y dasométricos conjuntamente:

$$LAI-D = 0,035Fcc + 3,732Lrc - 0,075Ht$$

iv) Se propone, para estimar el área foliar total de la masa y conociendo la distribución diamétrica sin corteza de la misma, la aplicación de la relación alométrica siguiente:

$$LA = 0,178 dsc^{1,787}$$

## REFERENCIAS

- ALLUÉ, J.L. (1990). Atlas Fitoclimático de España. MAPA-INIA. Madrid.
- CHEN, J.M. AND CIHLAR, J. (1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forest using Landsat TM images. *Remote Sens. Environ.* In press
- DAUGHTRY CST (1990). Direct measurements of canopy structure. *Remote Sensing Reviews* 5(1):45-60.
- DEBLONDE, G.; PENNER, M. AND ROYER, A. (1994) Measuring leaf area index with the LICOR LAI-2000 in pine stands. *Ecology* 75:1507-1511.
- FASSNACHT, K.; GOWER, S.T.; NORMAN, J.M. AND MCMURTRIE, R.E. (1994). A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agric. For. Meteorol.* 71: 183-207
- GOWER, S.T. AND NORMAN, J.M. (1991). Rapid estimation of Leaf Area Index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology* 72(5):1896-1900
- JARVIS, P.G. AND STEWART, J. (1979). Evaporation of water from plantation forest. In: E.D. Ford D.C. Malcolm and J. Atterson (Editors), *The Ecology of Even-Aged forest Plantation*. Institute of Terrestrial Ecology, Cambridge, pp 327-350
- LEGOFF, N. AND OTTORINI, J.M. (1996). Leaf development and stem growth of ash (*Fraxinus excelsior*) as affected by tree competitive status. *J Appl Ecol* 33:793-802
- MONSI, M. AND SAEKI, T. (1953). Uber den lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und sine Bedeutung fur die Stoffproduktion. *Jpn Bot* 14: 22-52
- MOSER, M.; ECKMULLNER, O.; HASENAUER, H. AND STERBA, H. (1995). Leaf area determination by electrooptical instruments. *Allg Forst Jagdztg* 166:89-94
- NORMAN, J.M. AND CAMPBELL, G.S. (1989). Canopy Structure. In: Pearcy RW, Ehrlinger J, Mooney HA, Rundel PW (eds) *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*. Chadman and Hall, London and New York: 301-325
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. (1987). Mapa de Series de vegetación de España E:1/400.000 y Memoria. ICONA. Madrid
- ROSS, J. (1981). The radiation regime and architecture of plant stands. Junk, W., The Hague: 1-391
- SELLERS, P.J.; MINTZ, Y.; SUD, Y.C. AND DALCHER, A. (1986). A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.* 43: 505-531
- SHINOZAKI, K.; YODA, K.; HOZUMI, K. AND KIRA, T. (1964). A quantitative analysis of plant form-The pipe model theory. I. Basic analyses. *Japanese Journal of Ecology* 14,3:97-105
- SHINOZAKI, K.; YODA, K.; HOZUMI, K. AND KIRA, T. (1964). A quantitative analysis of plant form- the pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *JPN J ECOL* 14:133-139
- VERTESSY, R.A.; BENYON, R.G.; OSULLIVAN, S.K. AND GRIBBEN, P.R. (1995). Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiol* 15:559-567
- WARING, R.H.; NEWMAN, K. AND BELL, J. (1981). Efficiency of tree crowns and stemwood production at different canopy leaf densities. *Forestry* 54:15-23
- WARING, R.H.; SCHROEDER, P.E. AND OREN, R. (1982). Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Can. Journal of Forest Research* 17:311-319
- WARING, R.H. (1985). Imbalanced forest ecosystems: assessments and consequences. *Forest Ecology and Management* 12:93-112

WARING, R.H.; THIES, W.G. AND MUSCATO, D. (1996). Stem Growth per Unit of Leaf Area: A Measure of Tree Vigor. *Forest Sci* 26(1):112-117

WELLES, J.M. (1990). Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews* 5(1):31-43

WELLES, J.M. AND COHEN, S. (1996). Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *J Exp Bot* 47:1335-1342.

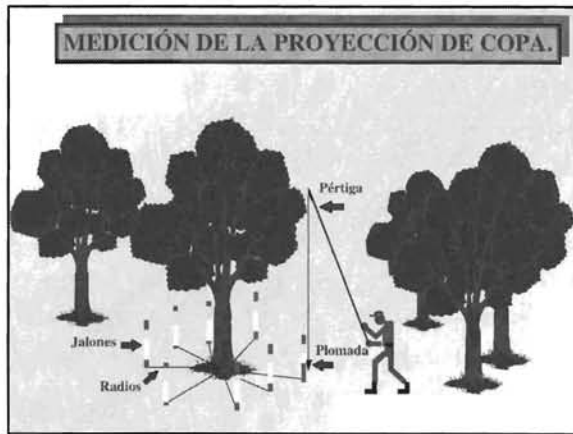


Figura 1. Procedimiento de medición de la proyección de la copa

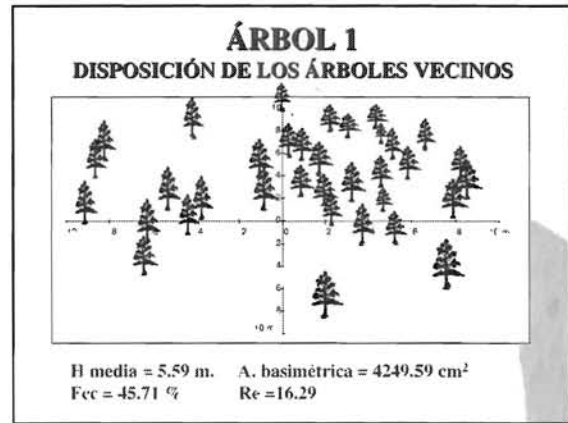


Figura 2. Esquema de localización de la masa circundante.

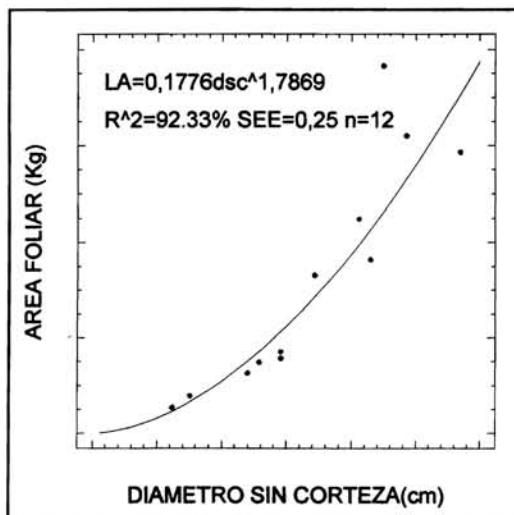


Figura 3: Relación alométrica entre el área foliar y el diámetro normal sin corteza.

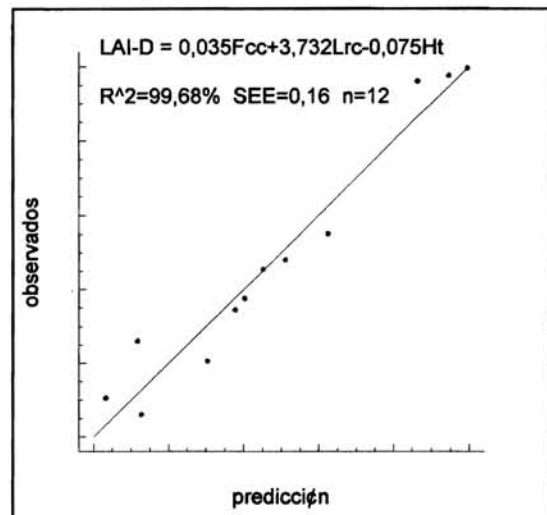


Figura 4: Representación del LAI-D observado versus LAI-D predicho por el modelo.

Nº	EDAD	Øn c.c.	Øn s.c.	Altura	Proyección	Área (m²)	LAI-D
ARBOL	(años)	(cm)	(cm)	total (m)	Copa (m²)	Foliar	(m²/m²)
1	73	36,6	28,5	12,6	22,12	58,83	2,66
2	58	29,6	22,5	11,86	21,11	76,51	3,62
3	60	31,2	21,5	12,95	16,4	36,36	2,22
4	43	19,7	14,6	9,82	7,11	17,02	2,39
5	54	21,6	17,2	10,81	9,06	33,12	3,65
6	44	17,5	12	9,64	6,87	12,55	1,82
7	56	28,8	24,3	11,98	22,09	61,91	2,8
8	46	18,7	12,9	8,11	7,74	14,78	1,91
9	59	25,7	20,6	11,45	12,3	44,77	3,69
10	26	8,9	6,2	5,82	2,02	5,36	2,61
11	44	18,1	14,6	9,62	6,34	15,55	2,45
12	36	10,8	7,6	7,44	3,68	7,78	2,11

Tabla 1. Parámetros dendrométricos.