

# Aplicación de imágenes LIDAR para la estimación del índice de superficie foliar (LAI) en encinas [*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.]

R. M.<sup>a</sup> Navarro Cerrillo<sup>1\*</sup>, M. Sánchez de la Orden<sup>2</sup>, J. Gómez Bonilla<sup>2</sup>,  
A. García-Ferrer<sup>2</sup>, R. Hernández Clemente<sup>1</sup> y S. Lanjeri<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Apdo. de Correos 3048. 14080 Córdoba. España

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Gráfica e Ingeniería y Sistemas de Información Cartográfica.  
Universidad de Córdoba. 14080 Córdoba. España

<sup>3</sup> Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universidad de Valencia. Valencia. España

---

## Resumen

El objetivo de este trabajo fue calcular el índice de superficie foliar (LAI) de árboles de encina (*Quercus ilex*) a partir de datos LIDAR. Se midieron en campo los valores individuales de LAI de 40 árboles con una cámara hemisférica (NIKON Coolpix 4500) de forma simultánea a la adquisición de los datos LIDAR. El LAI<sub>LIDAR</sub> se obtuvo aplicando un valor inverso del coeficiente de extinción ( $1/k$ ) de 1,48. Los valores de LAI en campo oscilaron entre 1,61 y 1,01 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> entre 1.01. Los coeficientes de determinación entre los valores de LAI en campo y el LAI<sub>LIDAR</sub> fueron de  $R^2=0,60$  (RMSE=0,16) y  $R^2=0,62$  (RMSE=0,21) para ecuaciones de tipo cuadrático y potencial respectivamente. Las variaciones entre el LAI de campo y el LAI<sub>LIDAR</sub> pueden atribuirse a la distribución de las hojas en la copa, la interferencia de elementos leñosos como ramas y ramillas, y la distribución vertical de los elementos de la copa. Las técnicas LIDAR han mostrado un resultado satisfactorio en el cálculo de LAI en encina, aunque su generalización depende de su coste y de la facilidad para ser aplicados sobre superficies grandes.

**Palabras clave:** dehesas, teledetección, parámetros foliares, estructura de copa.

## Abstract

### LIDAR-based estimation of leaf area index on Holm oak [*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.] trees

The aim of this paper was to estimate Leaf Area Index (LAI) of *Quercus ilex* by calculating the laser-intercepted rate through the forest canopy using LiDAR data. LAI was measured in 40 trees with a hemispheric camera (NIKON Coolpix 4500) and coincided with the acquisition of LIDAR data. The LiDAR-derived LAI<sub>LIDAR</sub> was then estimated by applying a value of the inverse of the coefficient of extinction of  $1/k = 1.48$ . The in-field LAI values varied between 1.01 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> and 1.61 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>. From a comparison of the LiDAR-derived to the field-derived LAI, the coefficients of the determination for the coefficient of extinction of 1.48 was  $R^2 = 0.60$  (RMSE = 0.16) for quadratic and  $R^2 = 0.62$  (RMSE = 0.21) for potential correlations. The change in accuracy was attributed to the density of leaves, the interference by stems, and the vertical number of branches in the forest stands. The LIDAR sensor technique gives a satisfactory result in the obtainment of leaf parameters in Holm oak trees, although its generalisation on field studies depends on its cost and suitability to be applied over large surfaces.

**Key words:** dehesas, remote sensing, leaf parameters, crown structure.

---

## Introducción

LIDAR (*Light Detection And Ranging*) es una tecnología emergente en el campo de los sensores láser, capaz de generar con gran rapidez alta densidad de da-

tos georeferenciados con una precisión al menos igual que la obtenida por los métodos tradicionales sobre el terreno, pero significativamente más rápido (Renslow *et al.*, 2000). Aunque los métodos de campo son generalmente más precisos, la relación entre el error y la eficacia en la adquisición hace que los datos LIDAR sean considerados una alternativa real a los métodos tradicionales. Se trata de equipos formados por sen-

---

\* Autor para la correspondencia: [irInacer@uco.es](mailto:irInacer@uco.es)

Recibido: 08-08-09; Aceptado: 15-12-09.

sores activos montados sobre una plataforma aerotransportada que emiten un pulso láser que permite medir distancias, y generar una nube de puntos de elevación muy precisa y especialmente densa. Esto se consigue con la combinación de tres tecnologías: un láser, un sistema de referencia inercial de alta precisión (IMU, *Inertial Measurement Unit*) y un sistema de posicionamiento global por satélite. La combinación de estos tres sistemas, montados en un único instrumento, permite obtener con gran rapidez y precisión Modelos Digitales del Terreno (Baltsavias, 2008).

De esta forma, esta reciente tecnología presenta un gran potencial para muchos tipos de estudios y aplicaciones al proporcionar una alta cantidad de datos, así como la georeferenciación digital de la elevación de los mismos con gran precisión (precisión absoluta de elevación de 15 cm, y precisión absoluta de coordenadas X e Y comprendidas entre 0,001 cm y 1 m) (Flood, 2004). Otra de las ventajas de esta nueva tecnología es que, al contrario que la imagen adquirida con cámaras fotogramétricas, los instrumentos LIDAR son sistemas de sensores activos y, como consecuencia, ofrece importantes ventajas sobre la fotogrametría, ya que puede penetrar a través de las copas de los árboles, facilitando información de la superficie que se encuentra bajo los mismos y permitiendo construir un modelo digital del terreno bajo la cubierta forestal (Renslow *et al.*, 2000).

Las aplicaciones LIDAR más frecuentes en estudios forestales han sido para la determinación de atributos estructurales básicos, incluyendo la altura, la cobertura del dosel y los perfiles verticales, y partir de ellos medidas indirectas (por ej., área basimétrica, volumen de madera o biomasa) (ver Hill *et al.*, 2008, para una amplia revisión). Los primeros estudios usaban LIDAR para determinar parámetros simples de estructura de bosque, en particular la altura del dosel. Los estudios más recientes se aplican al cálculo de otros parámetros como el diámetro normal, el área basimétrica o la densidad (Hudak *et al.*, 2008; Naesset y Gobakken, 2008), bien a partir de su relación con medidas directas (por ej., la altura o las dimensiones de copa; Hyypä *et al.*, 2001), o a partir de modelos espaciales de copa (Chen *et al.*, 2007; Van der Zande *et al.*, 2009). Muchos de estos trabajos explotan la capacidad del sensor LIDAR para penetrar bajo la cubierta, suministrando información sobre los modelos digitales de elevaciones (Lee y Lucas, 2007; Chen *et al.*, 2007; Jang *et al.*, 2008), así como los datos de intensidad de LIDAR (Antonarakis *et al.*, 2008). Los resultados obtenidos se han aplicado en el ámbito forestal, por ejemplo para inventarios fores-

tales (Means *et al.*, 2000; Gobakken y Naesset, 2004; Coromines *et al.*, 2005; Suárez *et al.*, 2005) o en estudios de defoliación (Solberg, *et al.*, 2006). Más recientemente, se ha incorporado esta tecnología a estudios de ecofisiología de sistemas forestales mediterráneos (Riaño *et al.*, 2004; Van der Zande *et al.*, 2009).

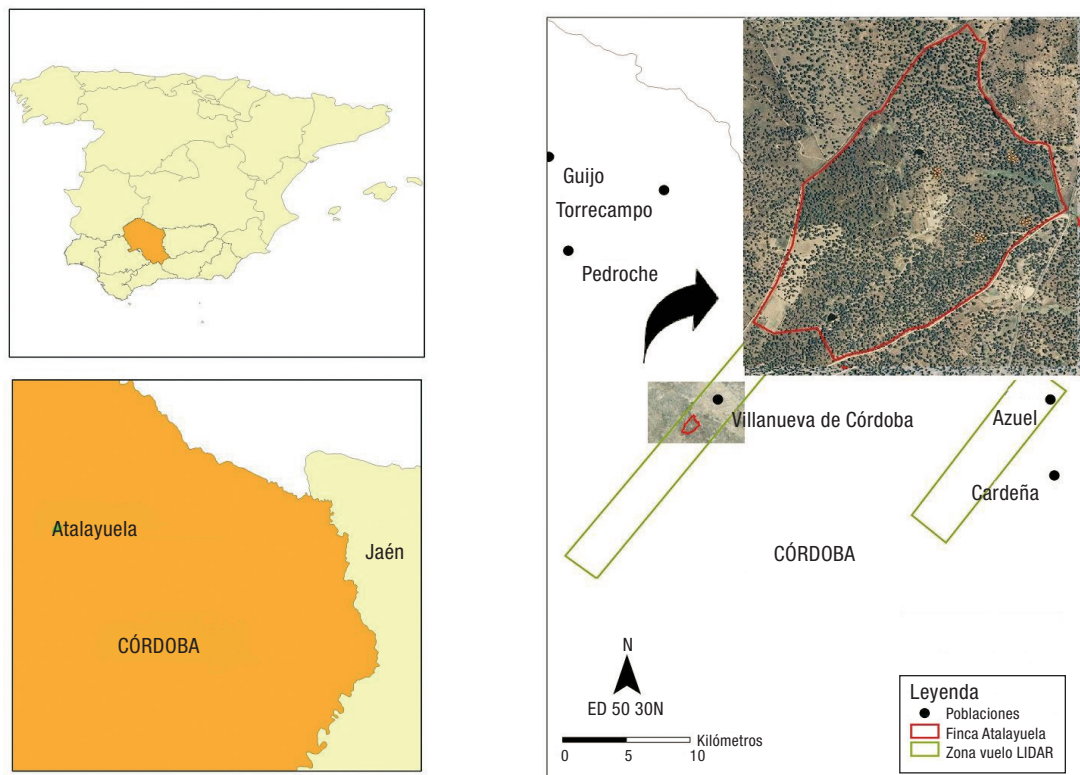
El índice de área foliar (LAI) es una variable clave para estudios de ecofisiología de sistemas forestales (Glomer *et al.*, 1999). Su determinación es importante para comprender varios procesos biofísicos en sistemas forestales y para pronosticar el crecimiento, la productividad o el intercambio gaseoso (Moreno y Cubera, 2008). El concepto de LAI hace referencia al conjunto de masa foliar de una cobertura vegetal y, por tanto, a su capacidad de fotosíntesis, relacionado con el contenido de pigmentos (por ej., clorofila), a la transpiración de la planta y al intercambio de CO<sub>2</sub>. El cálculo de LAI se ha realizado por métodos directos, destructivos y costosos, y más frecuentemente mediante métodos indirectos (Jonckheere *et al.*, 2004). Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones para la estimación del LAI en grandes superficies, y para doseles con estructuras complejas. El LIDAR es capaz de suministrar información de la superficie del dosel, con alta precisión (Kwak *et al.*, 2008), lo que ha permitido su aplicación en distintos estudios que requieren de este parámetro (Riaño *et al.*, 2004; Kwak *et al.*, 2008). Sin embargo, es todavía difícil generalizar el uso de LIDAR aerotransportado para estudios de LAI en árboles individuales y estructuras forestales muy distintas (Naesset *et al.*, 2004; Lucas *et al.*, 2008; Hyde *et al.*, 2006; Jang *et al.*, 2008; Reitberger *et al.*, 2008).

La literatura, sin embargo, a penas aporta estudio de LAI a partir de datos LIDAR con especies mediterráneas (Riaño *et al.*, 2004; Van der Zande *et al.*, 2009), para lo cual es necesario hacer trabajos de investigaciones que permitan mejorar la fiabilidad de los resultados. El objetivo de este trabajo fue calcular el índice de superficie foliar (LAI) de árboles de encina (*Quercus ilex*) a de imágenes de superficie obtenidas con el sensor LIDAR (ALS 50 II).

## Material y métodos

### Zona de estudio

El área de trabajo se encuentra situada en la zona conocida como Finca Atalayuela, (UTM X = 355781; Y = 4240862) en el Valle de los Pedroches, término



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio para estimación de LAI mediante datos de campo y LIDAR aerotransportado.

municipal de Villanueva de Córdoba (Fig. 1). La zona se encuentra situada a 657 msnm, en un clima mediterráneo seco (fitoclima IV<sub>4</sub> mediterráneo genuino). El suelo dominante corresponde a cambisoles eútricos. La vegetación presenta una estructura adhesionada, de porte arbóreo propia de un aprovechamiento de bellota por montanera. En el área de estudio se seleccionaron 40 árboles de encina [*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.], bien diferenciados, sin tangencia de copas, y en zonas sin matorral, localizados en 4 parcelas de muestreo de 1 ha repartidas uniformemente (Fig. 1), buscando árboles que presentaran un rango amplio de índice de superficie foliar en función del estado de las copas, y una buena accesibilidad. Dadas las características de uniformidad de la dehesa estudiada, los árboles presentaron características similares en cuanto al diámetro normal, la altura, y el diámetro de copa (Tabla 1).

### Medidas de índice de superficie foliar (LAI)

En cada parcela se procedió a medir el LAI en los 10 árboles seleccionados mediante una cámara hemisfé-

rica. La cámara utilizada fue una NIKON Coolpix 4500 (Nikon Corporation Imaging Company, Japon) equipada con una lente angular NIKON *fisheye lenses* FC-E8 y Nikkor 10,5 mm, con función de proyección polar. A partir de las fotografías hemisféricas digitales (DHPs, *Digital Hemispherical Photographs*) se estimó el índice de área foliar (LAI) (Jonckee *et al.*, 2004). Los datos obtenidos se corrigieron aplicándoles un factor de inclinación de hoja (Coeficiente *clumping*) para *Quercus ilex* de 0,7 (Sala y Tenhunen, 1996). La campaña de medidas fue realizada durante la primera quincena de febrero de 2007 en días nublados para evitar la incidencia de radiación directa sobre el sensor. Se determinó cada árbol y se definieron cuatro transectos de 20 metros de longitud en ejes perpendiculares. A lo largo de esos transectos se colocó una marca a los 2 metros del tronco, haciendo una medida en cada marca, con un total de 40 medidas en parcela.

### Adquisición y procesado de datos LIDAR

Los datos LIDAR utilizados en este trabajo fueron adquiridos en un vuelo realizado por la empresa ES-

**Tabla 1.** Características de las parcelas y árboles estudiados para el cálculo de LAI a partir de datos LIDAR (TM Villanueva de Córdoba, Córdoba). Media  $\pm$  desviación estándar

	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4
<i>Características físicas</i>				
UTM X	356.305,61	35.6081,17	355.917,29	356.244,44
UTM Y	4.240.868,71	4.240.791,30	4.241.084,69	4.241.117,71
Altitud msnm	657	657	657	657
Pendiente (%)	3	4	3	5
Litología	Granitos biotíticos	Granitos biotíticos	Granitos biotíticos	Granitos biotíticos
<i>Características selvícolas</i>				
Especie principal	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus ilex</i>
Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )	61	65	60	67
Diámetro de copa (m <sup>2</sup> )*	5,70 $\pm$ 0,97	6,10 $\pm$ 0,63	5,63 $\pm$ 0,81	5,90 $\pm$ 0,79
Área basimétrica (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )*	9,11	13,70	6,81	10,94
Diámetro normal (cm) *	42,90 $\pm$ 0,08	51,07 $\pm$ 0,06	40,87 $\pm$ 0,09	45,10 $\pm$ 0,07
Altura dominante (m) *	6,60 $\pm$ 0,72	6,91 $\pm$ 0,74	5,71 $\pm$ 0,78	6,63 $\pm$ 0,61
LAI (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ) *	1,01 $\pm$ 0,20	1,17 $\pm$ 0,25	1,61 $\pm$ 0,23	1,35 $\pm$ 0,26

\* Calculado para los 10 árboles medidos por parcela.

TEROCARTO SL (Madrid, España) el día 12 de febrero de 2007, utilizando una cámara ALS50-II (Leica-Geosystems SL), montada sobre una aeronave Cessna 402-C que permite una capacidad de emisión de pulsos laser de 150 kHz por segundo (Tabla 2).

Los datos LIDAR fueron procesados con el programa *TerraScan* (Terrasolid Ltd, Jyväskylä Finlandia), una aplicación software para el programa *MicroStation*. El procesado de los datos comprendió los siguientes pasos:

**Tabla 2.** Características del sensor LIDAR ALS50 II

Sensor empleado	ALS50 II
Número de serie	SN 73
Altura de vuelo	200 m-6.000 m
Frecuencia de pulsación	Hasta 150.000 Hz (150.000 pulsos/seg)
Precisión a priori	Hasta 10 cm en altimetría
Número de retornos capturados	4
Campo de visión (FOV)	10°-75°
Captura de intensidades	Una por pulso
Tecnología MPiA (Multiples Pulses in Air)	Sí
Tamaño del píxel ( $\mu$ m)	12
Densidad de puntos (ptos/m <sup>2</sup> )	Hasta 12
Parámetros de distorsión	Imágenes libres de distorsión

— Definir y clasificar los puntos en las diferentes clases identificadas en la zona de vuelo: suelo y vegetación.

— Eliminar el solape entre líneas de vuelo (*Fly-lines*), para evitar errores de adquisición, así como eliminar los puntos innecesarios o erróneos de la zona seleccionada.

— Introducir las coordenadas de los árboles de estudio.

— Definir la superficie de referencia para la adquisición de datos LIDAR en función del tipo y tamaño de la vegetación para optimizar el cálculo del LAI.

— Cuantificar los retornos por encima y por debajo del dosel en cada árbol.

### Calculo de LAI a partir de datos LIDAR

Una vez obtenida esa información se aplicó la ecuación [1] propuesta por Solberg *et al.* (2006) para calcular valores de LAI:

$$LAI_{LIDAR} = (1/K) \ln(N_a/N_b) \quad [1]$$

siendo:

K = coef. de extinción:  $1/(2 \cdot \cos \mu)$ ;  $\mu$ : ángulo cenital.

N<sub>a</sub> = número total de retornos.

N<sub>b</sub> = número de retornos bajo la cubierta vegetal, en un círculo de diámetro aproximado a la proyección de copa.

**Tabla 3.** Valores de los parámetros de cálculo de LAI<sub>LIDAR</sub> obtenidos en función de diferentes valores del inverso del coeficiente de extinción [ $1/\kappa$ ]

Parcela	Na	Nb	In Na/Nb	LAI	LAI $1/\kappa = 0,5$	LAI $1/\kappa = 1$	LAI $1/\kappa = 1,26$	LAI $1/\kappa = 1,48$	LAI $1/\kappa = 2$
1	225,40	99,20	0,81	1,01 ± 0,20	0,40 ± 0,19	0,81 ± 0,18	1,02 ± 0,23	1,20 ± 0,15	1,63 ± 0,27
2	1.162,40	531,60	0,78	1,17 ± 0,25	0,38 ± 0,20	0,78 ± 0,22	0,98 ± 0,21	1,16 ± 0,18	1,56 ± 0,25
3	469,10	178,90	0,96	1,61 ± 0,23	0,48 ± 0,20	0,96 ± 0,20	1,21 ± 0,21	1,42 ± 0,18	1,92 ± 0,30
4	417,40	174,80	0,89	1,35 ± 0,26	0,46 ± 0,21	0,93 ± 0,18	1,17 ± 0,19	1,38 ± 0,20	1,86 ± 0,22

Los datos del término Nb se calcularon para un radio correspondiente a la proyección de copa de cada árbol por ser el valor del diámetro que mejor se adecuaba a la estructura de la vegetación objeto de estudio (monte adhesado de baja densidad sin tangencia de copas). En cuanto al inverso del coeficiente de extinción ( $1/\kappa$ ) se probaron distintos valores partiendo del valor de 1,48 propuesto por Solberg *et al.* (2006). Los valores ensayados fueron: 0,5, 1,0, 1,26, 1,48, y 2,0.

### Análisis de los datos

El análisis de los datos de LAI en campo y de LAI<sub>LIDAR</sub> se realizó mediante regresión. El análisis consistió en el cálculo e interpretación de modelos lineales, potenciales, exponenciales, logarítmicos, cuadráticos y cúbicos. El análisis estadístico se realizó con el programa SPSS 12.0. La bondad del ajuste se analizó a partir de:

— Medidas relativas de la bondad del ajuste, utilizando el coeficiente de correlación  $R$ , de determinación  $R^2$ , y el error estándar de estimación  $SE$ .

— Pruebas de la bondad del ajuste: analizando la varianza para contrastar la significación del estadístico  $R^2$  mediante el cálculo del estadístico  $F$  y su nivel de significación  $p$ .

**Tabla 4.** Ecuaciones de regresión y coeficientes de determinación para las funciones de ajuste entre LAI ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) en campo y LAI<sub>LIDAR</sub> ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) obtenido a partir de la ecuación de Solberg *et al.* (2006) ( $N = 40$ ) para tres valores del inverso del coeficiente de extinción

Inverso del coeficiente de extinción	Ecuación	$R^2$	SE	$P$	F
$1/\kappa = 1,48$	LAI = 1,194 LAI <sub>LIDAR</sub> <sup>0,655</sup>	0,63	0,16	<0,001	69,02
	LAI = -0,1613 LAI <sub>LIDAR</sub> <sup>2</sup> + 1,105 LAI <sub>LIDAR</sub> + 0,265	0,66	0,21	<0,001	31,57
$1/\kappa = 1,26$	LAI = 1,001 LAI <sub>LIDAR</sub> <sup>0,959</sup>	0,55	0,21	<0,001	66,36
	LAI = 0,131 LAI <sub>LIDAR</sub> <sup>2</sup> + 0,763 LAI <sub>LIDAR</sub> + 0,110	0,57	0,24	<0,001	33,40
$1/\kappa = 2,00$	LAI = 0,643 LAI <sub>LIDAR</sub> <sup>0,958</sup>	0,51	0,23	<0,001	60,09
	LAI = 0,054 LAI <sub>LIDAR</sub> <sup>2</sup> + 0,474 LAI <sub>LIDAR</sub> + 0,115	0,48	0,23	<0,001	33,32

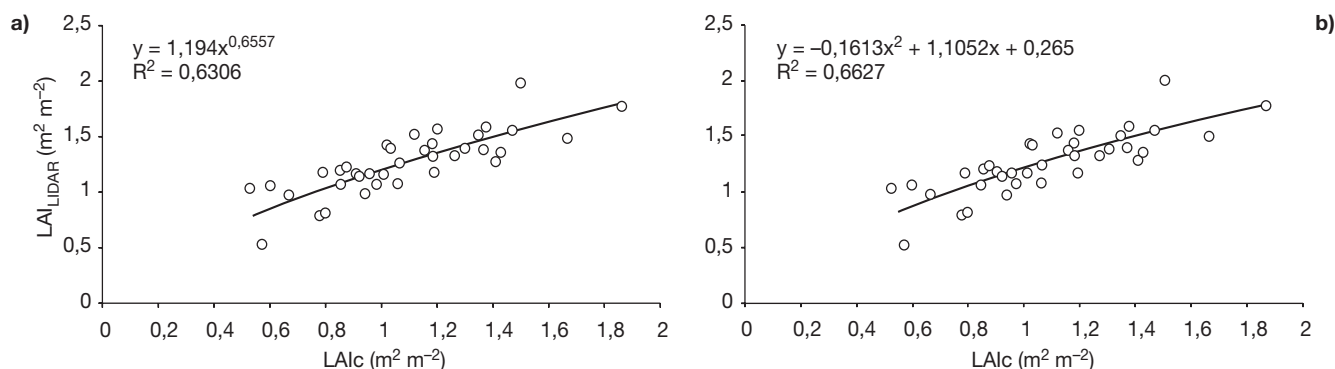
## Resultados

### Determinación de los valores de LAI a partir de la imagen LIDAR

En la Tabla 3 se muestran los datos de Índice de Área Foliar obtenidos mediante la cámara hemisférica (LAI) y a partir de los datos de LIDAR (LAI<sub>LIDAR</sub>), para los diferentes valores del inverso del coeficiente de extinción ensayados (0,5, 1,0, 1,26, 1,48, y 2,0). Los valores de LAI en campo variaron entre 1,01  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$  y 1,61  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ . Los valores más próximos de LAI<sub>LIDAR</sub> a los valores reales fueron los obtenidos para un valor del inverso del coeficiente de extinción de 1,48. La mayor variación se produjo para los árboles localizados en la parcela 1, con una diferencia del 18% respecto al valor de campo, y la menor para los árboles localizados en la parcela 2, con apenas una variación del 0,8%.

### Cálculo de los modelos de regresión entre LAI de campo y LAI<sub>LIDAR</sub>

En la Tabla 4 se muestran las ecuaciones de regresión que mejor ajustaron los valores de LAI en campo y los valores LAI<sub>LIDAR</sub>, en función de los diferentes va-



**Figura 2.** Curvas de regresión entre valores de LAI en campo (LAIc) y LAI obtenido a partir de LIDAR (LAI<sub>LIDAR</sub>) en campo según un modelo potencial (a) y cuadrático (b) para un valor del inverso del coeficiente de extinción de  $[1/\kappa] = 1,48$ .

lores del inverso del coeficiente de extinción. El valor de los coeficientes de determinación de las regresiones estudiadas para los distintos valores del inverso del coeficiente de extinción  $[1/\kappa]$ , fueron muy similares ( $R^2 = 0,60-0,62$ ;  $RMSE = 0,16-0,21$ )  $[1/\kappa = 1,48]$  para correlaciones cuadráticas y potenciales, siendo los valores de los coeficientes de determinación muy similares para todos los valores de  $[1/\kappa]$ , aunque algo más elevados para las funciones potenciales en todos los casos (Fig. 2).

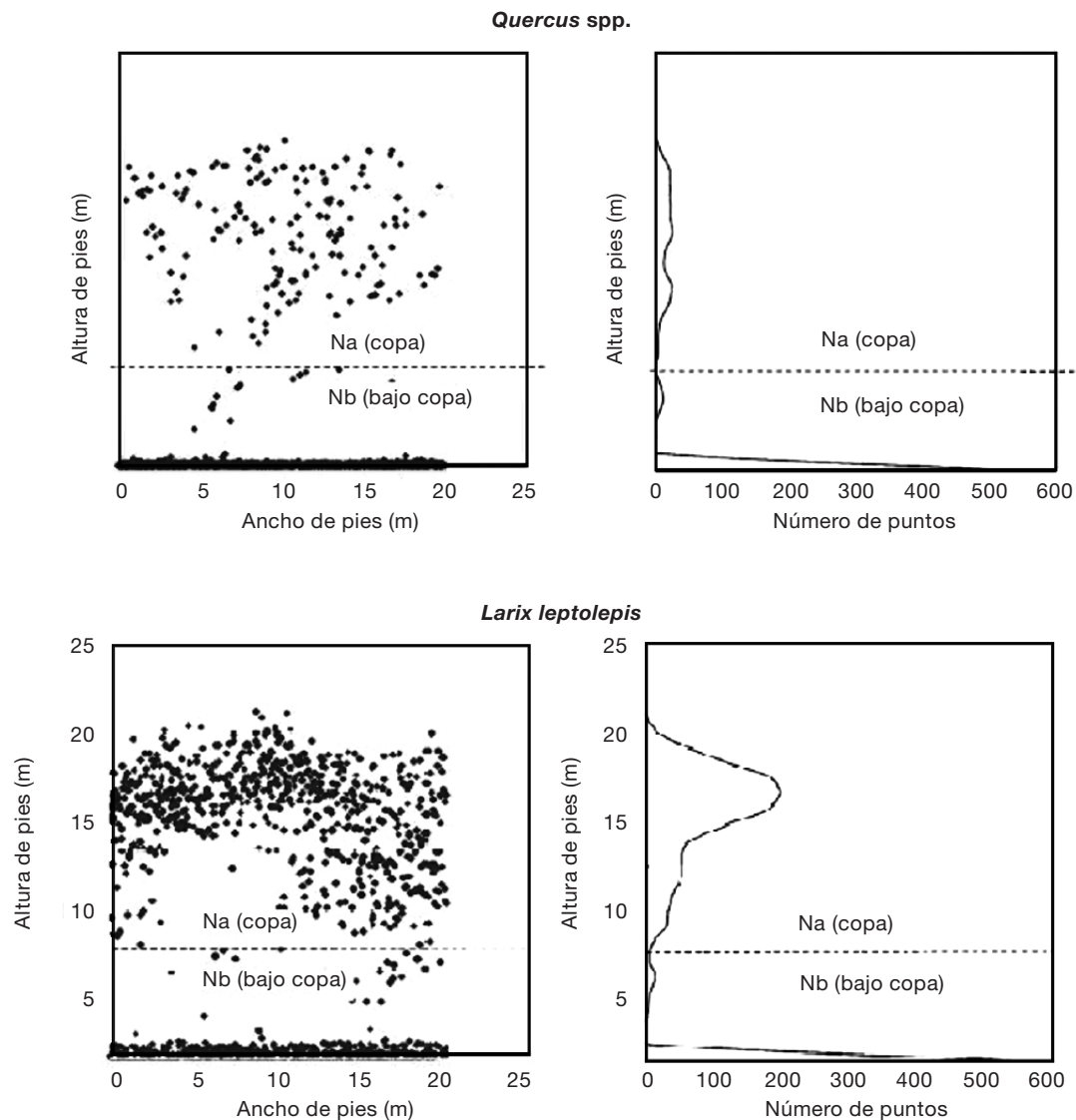
## Discusión

Los valores medios de LAI obtenidos para los diez árboles medidos en cada parcela de estudio fueron bajos ( $1,01 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ – $1,61 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ) si los comparamos con lo observado en otros trabajos. Algunos autores han obtenido valores próximos o superiores a  $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , pero en masas densas de encina (Bussotti *et al.*, 2002; Hoff *et al.*, 2002). Sin embargo, en trabajos realizados en dehesas de encina los valores son muy próximos a los observados en este trabajo, así Infante *et al.*, (1999) obtuvieron valores entre  $1,6$  y  $2,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , en formaciones de densidad parecida a las de este trabajo. El bajo valor de LAI obtenido pudo estar influenciado por el mal estado del arbolado, ya que la parcela presenta síntomas de decaimiento, con defoliaciones parciales y fenómenos de puntisecado, muy frecuentes en la dehesas de Andalucía (Navarro Cerrillo *et al.*, 2004). En este trabajo se optó por tomar las medidas de LAI a 2 metros del tronco, lo cual no debe haber afectado a los valores obtenidos, de acuerdo a los resultados mostrados por Riaño *et al.* (2004) al comparar valores de LAI con cámara hemisférica a distintas distancias del centro de la parcela.

Los valores de LAI estimados a partir de la ecuación de Solberg *et al.* (2006) muestran diferencias variables (entre un 18% y un 0,8%), que se puede atribuir a la estructura de copa que presenta esta especie, con falta de hojas en numerosos tallos leñosos (van der Zande *et al.*, 2009), y que ya fue puesta de manifiesto al comparar especies de este género con *Larix leptolepis* Gord (Kwak *et al.*, 2008) (Fig. 3). Como se observa en la Figura 3, *Larix leptolepis* presenta una copa con una gran densidad de hojas cubriendo la mayor parte de ramillos, lo que permite un mejor comportamiento del sensor LIDAR, y una mejor relación con los valores de LAI en campo.

El valor de los coeficientes de determinación de las regresiones estudiadas para los distintos valores del inverso del coeficiente de extinción  $[1/\kappa]$ , fueron muy similares ( $R^2 = 0,600,62$ ;  $RMSE = 0,16-0,21$ ) para correlaciones cuadráticas y potenciales. Estos resultados son muy similares a los obtenidos por Chen *et al.* (1997) ( $R^2 = 0,65$ ;  $RMSE = 0,52$ ). Las diferencias observadas pueden deberse al número y tipos de medidas de LAI realizadas, ya que estos autores realizaron medidas con dos LAI-2000 (LiCor), uno por encima de la copa y otro por debajo del dosel, lo que mejora la calidad de la medida de LAI. Valores similares se han obtenido en trabajos relacionados con procesos de defoliación en diferentes tipos de bosques (Koukoulas y Blackburn, 2005; Solberg *et al.*, 2006).

El valor del inverso del coeficiente de extinción  $[1/\kappa = 1,48]$  propuesto por Solberg *et al.* (2006), ha mostrado buenos resultados en el caso de árboles de encina. Como el coeficiente de extinción se relaciona inversamente con el ángulo cenital  $[\kappa = 1/(2 \cdot \cos\mu)]$  se estimó que los valores para  $[1/\kappa]$  deben oscilar entre 0,5 y 2,88, aunque no se han encontrado grandes diferencias cuando se utilizan valores comprendidos



**Figura 3.** Diferencias en el comportamiento de los valores de Na: número total de retornos, y Nb: número de retornos bajo la cubierta vegetal entre *Quercus* spp. y *Larix leptolepis* Gord (Kwak *et al.*, 2008).

en un rango entre 0,5 y 2. En este trabajo se optó por reducir el área considerada para el cálculo de  $LAI_{LIDAR}$  a la proyección de la copa, a diferencia de lo hecho en otros trabajos, donde suele tomarse un diámetro entre 2,5 y 18 m (Riaño *et al.*, 2004). En el caso de montes densos de *Quercus pyrenaica* Willd. se han obtenido coeficientes de correlación superiores 0,6, lo cual parece lógico al promediar mejor el valor medio de LAI para el conjunto del dosel. En montes huecos, como son las dehesas, el trabajar con radios variables no parece lo más adecuado, ya que se trata de estructuras que no presentan copas trabadas, y permiten la diferenciación individual de los pies, aunque esto está condicionado por la densidad del arbolado. Se comprobó

que utilizando diámetros próximos a la proyección del dosel de copa para cada árbol se conseguían valores que se ajustaban más a los valores finales que se estimaban.

El LIDAR aerotransportado es una herramienta adecuada para determinar el LAI en grandes superficies (Solber *et al.*, 2006; Kwak *et al.*, 2008). En particular en este trabajo se han obtenido buenos resultados para formaciones de bosques poco densos (dehesas) en un ambiente mediterráneo. El estudio de las copas de árboles mediante LIDAR depende de la densidad de la masa, y del grado de trabado de las copas, en los casos en que las copas se presenten compactas o en aquellas donde hay una ramificación muy desarrolla-

da pueden aparecer *falsas* copas que en realidad pertenecen a un mismo árbol, lo que dificulta el análisis y reduce la precisión de los resultados. Con objeto de evitar este problema, es aconsejable el estudio previo de la zona mediante ortofotos para diferenciar los tipos de masa en los cuales se va a trabajar. Por otro lado, con este estudio se ha podido comprobar que el registro de datos mediante tecnología LIDAR no se ve afectada por el ángulo cenital solar, como pasa con la cámara hemisférica o el LiCor LAI 2000, lo que supone un ventaja, ya que no resulta indispensable trabajar durante un periodo determinado (amanecer, atardecer o nubosidad constante).

## Conclusión

El uso de LIDAR para aplicaciones en inventario forestal y selvicultura es relativamente reciente en nuestro país, debido a la dificultad de adquisición de datos, y su procesado en condiciones operativas para la gestión forestal. La necesidad de estudiar con más profundidad el error asociado a estos estudios respecto a las técnicas tradicionales, los costos finales, y la falta de técnicos especializados limita su generalización. El uso de LIDAR es, sin embargo, cada vez más frecuente (Hill *et al.*, 2008), para obtener información de gran interés forestal (por ej., MDE, estructura de sistemas forestales y parámetros relacionados con la selvicultura y la ordenación forestal), así como el potencial de integrar estos datos con otros sensores remotos.

En este trabajo se ha mostrado que la tecnología LIDAR es adecuada para la medida de LAI en árboles de encina en formaciones adhesionadas, en particular cuando los árboles presentan copas bien diferenciadas y no trabadas, obteniéndose valores similares a los adquiridos con métodos indirectos de campo, resultando. En los próximos años los trabajos realizados para especies clave en ecosistemas mediterráneos, como el mostrado en esta investigación, permitirá mejorar la elección de los parámetros de cálculo, y el ajuste de ecuaciones más fiables para una fácil generalización e estudios sobre grandes superficies.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto LINHE (*Development of new protocols of LIDAR, Digital*

*Camera, NIR and Hyperspectral sensors integration for forestry management applications*), realizado entre la Universidad de Córdoba, la Universidad Politécnica de Madrid, Esterocarto SL, y TRAGSA, con el financiamiento del programa del Ministerio de Ciencia y Tecnología y el proyecto INTERBOS (CGL2008-04503-C03-01/BOS).

## Referencias

- ANTONARAKIS A., RICHARDS K., BRASINGTON J., 2008. Object-based land cover classification using airborne LiDAR. *Remote Sensing of the Environment* 112(6), 2988-2998.
- BALTSAVIAS E., 2008. Introduction to airborne LIDAR and physical principles of LIDAR technology. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland. 361 pp.
- BUSSOTTI L., BETTINI D., GROSSONI P., MANSUINO S., NIBBI R., SODA C., TANI C., 2002. Structural and functional traits of *Quercus ilex* in response to water availability. *Environmental and Experimental Botany* 47, 11-23
- CHEN J.M., RICH P.M., GOWER S.T., NORMAN J.M., PLUMMER S., 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 102, 429-443.
- CHEN Q., GONG P., BALDOCCHI D., TIAN Y., 2007. Estimating basal area and stem volume for individual trees from lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73(12), 1355-1365.
- COROMINES M., BLANCO E., RUIZ A., 2005. Aplicación de la tecnología LIDAR al estudio de la cubierta vegetal. *Cuad Soc Esp Cienc For* 19, 71-77.
- FLOOD M., 2004. The skinny on airborne laser mapping URL: <http://www.airbornelasermapping.com> [Consulta: 26 de febrero de 2009].
- GLOWER S.T., KUCHARIK C.J., NORMAN J.M., 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, f(PAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing Environ* 70(1), 29-51.
- GOBAKKEN T., NAESSET E., 2004. Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(6), 529-542.
- HILL R., ROSETTE J., SUÁREZ J. (eds). *Proceedings of SilvaLaser-2008*. Edimburg, UK.
- HOFF C., RAMBAL S., JOFFRE R., 2002. Simulating carbon and water flows and growth in a Mediterranean evergreen *Quercus ilex* coppice using the FOREST-BGC model. *Forest Ecology and Management* 164, 121-136.
- HUDAK A., CROOKSTON N., EVANS J., HALL D., FALKOWSKI M., 2008. Nearest neighbour imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of the Environment* 112(5), 2232-2245.



- HYDE P., DUBAYAH R., WALKER W., BLAIR B.J., MICHELLE H., HUNSAKER C., 2006. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sensing of the Environment* 102, 63-73.
- HYYPÄ J., KELLE O., LEHIKONEN M., INKINEN M., 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing* 39(5), 969-975.
- INFANTE J.M., DAMESIN C., RAMBAL S., FERNÁNDEZ-ALES R., 1999. Modelling leaf gas exchange in Holm-oak trees in southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 95, 203-223.
- JANG J., PAYAN V., VIAU A., DEVOST A., 2008. The use of airborne lidar for orchard tree inventory. *International Journal of Remote Sensing* 29(6), 1767-1780.
- JONCKHEERE I., FLECK S., NACKAERTS K., MUYS B., COPPIN P., WEISS M., BARET F., 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 19-35.
- KOUKOULAS S., BLACKBURN G.A., 2005. Mapping individual tree location, height and species in broadleaved deciduous forest using airborne LIDAR and multi-spectral remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 26(3), 431-455.
- KWAK D., LEE W., CHO H., 2008. Estimation of effective plant area index using LIDAR data in forest of South Korea. In: *SilvaLaser* Edimburg, UK. pp. 237-246.
- LEE A., LUCAS R.M., 2007. A LiDAR derived canopy density model for tree stem and crown mapping in Australian woodlands. *Remote Sensing of the Environment* 111, 493-518.
- LUCAS R.M., LEE A., & BUNTING P., 2008. Retrieving Forest Biomass through integration of CASI and LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing* 29(5), 1553-1577.
- MEANS J.E., ACKER S.A., FITT B.J., REMSLOW M., EMERSON J., HENDRIX C.J., 2000. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning Lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66(11), 1367-1371.
- MORENO G., CUBERA E., 2008. Impact of stand density on water status and leaf gas exchange in *Quercus ilex*. *Forest Ecology and Management* 254, 74-84.
- NÆSSET E., GOBAKKEN T., 2008. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser, *Remote Sensing of the Environment* 112(6), 3079-3090.
- NAESSET E., GOBAKKEN T., HOLMGREN J., HYYPPÄ H., HYYPPÄ J., MALTAMO M., 2004. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, 482-499.
- NAVARRO CERRILLO R.M., FERNÁNDEZ REBOLLO P., TRAPERO A., CAETANO P., ROMERO M.A., SÁNCHEZ M.E., FERNÁNDEZ CANCIO A., SÁNCHEZ I., LÓPEZ PANTOJA G., 2004. Los procesos de decaimiento de encinas y alcornoques. *Consejería de Medio Ambiente-Universidad de Córdoba, Junta de Andalucía, Sevilla, España*. 56 pp.
- REITBERGER J., KRZYSZEK P., STILLA U., 2008. Analysis of full waveform LiDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing* 29(5), 1407-1431.
- RENSLOW M., GREENFIELD P., GUAY T., 2000. Evaluation of Multi-Retur LIDAR for forestry applications. US Department of Agriculture Forest Service-Engineering, *Remote Sensing Applications*. <http://www.ndep.gov/USDAFS/LIDAR.pdf> [Consulta: 12 de marzo de 2009].
- RIAÑO D., VALLADARES F., CONDÉS S., CHUVIECO E., 2004. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (LIDAR) in two contrasting forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 269-275.
- SALA A., TENHUNEN J.D., 1996. Simulations of canopy net photosynthesis and transpiration in *Quercus ilex* L. under the influence of seasonal drought. *Agricultural and Forest Meteorology* 78, 203-222.
- SOLBERG S., NÆSSET E., HANSSSEN K.H., CHRISTIANSEN E., 2006. Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 102, 364-376.
- SUÁREZ J.C., ONTIVEROS C., SMITH S., SNAPE S., 2005. Use of airborne LIDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computers and Geosciences* 31(2), 253-262.
- VAN DER ZANDE D., MEREU S., NADEZHINA N., CERMAK J., MUYS B., COPPIN P., MANES F., 2009. 3D upscaling of transpiration from leaf to tree using ground-based LIDAR: application on a Mediterranean Holm oak (*Quercus ilex* L.) tree. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1573-1583.