

# Documento técnico: Obtención de variables forestales a partir de datos LiDAR

---



MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

ORGANISMO  
AUTÓNOMO  
PARQUES  
NACIONALES



RED DE  
PARQUES NACIONALES



# Obtención de variables forestales a partir de datos LiDAR

<b>1</b>	<b>Introducción a la tecnología LiDAR .....</b>	<b>5</b>
1.2.	Clasificación de los sensores LiDAR.....	7
<b>2</b>	<b>Identificación y propuesta de variables a obtener a partir de datos LiDAR y metodologías de obtención .....</b>	<b>9</b>
2.1.	Metodologías para la estimación de la altura del dosel .....	10
	<i>2.1.1.Precisión en las estimaciones de las alturas de la vegetación. Orientación para la interpretación de los resultados. ....</i>	<i>13</i>
2.3.	Metodologías para la estimación del porcentaje de copa .....	17
	<i>2.3.1.Precisión en las estimaciones del porcentaje de copa. Orientación para la interpretación de los resultados. ....</i>	<i>20</i>
2.4.	Metodologías para la determinación de la estructura vertical del dosel .....	21
	<i>2.4.1. Precisión en la determinación de la estructura vertical del dosel. Orientación para la interpretación de los resultados. ....</i>	<i>25</i>
<b>3</b>	<b>Métodos para la estimación de características forestales en campo.....</b>	<b>26</b>
3.1.	Estimación de la altura de la vegetación en campo .....	26
3.2.	Estimación del porcentaje de copa en campo .....	27
3.3.	Determinación del tamaño de la muestra .....	29

## 1 Introducción a la tecnología LiDAR

En los últimos años la tecnología LiDAR ha experimentado un gran potencial para multitud de aplicaciones ambientales, debido a su capacidad para generar densas nubes de puntos que describen la superficie del terreno.

Una de los campos donde el uso de la tecnología LiDAR ha experimentado un mayor avance ha sido el campo forestal, tanto en aplicaciones de inventario como ecológicas, debido a la información sobre la estructura vertical de la vegetación que proporciona.

Este documento presenta una revisión de métodos empleados para la obtención de variables forestales a partir de datos LiDAR. En primer lugar se presenta una introducción a dicha tecnología y la información que puede obtenerse mediante los sensores LiDAR. Posteriormente se presentan algunas variables que pueden estimarse a partir de los datos LiDAR así como los métodos comúnmente empleados para su estimación. Finalmente se presentan métodos para la obtención de dichas variables en campo, lo que permitirá obtener información para validar las estimaciones hechas a partir de los datos LiDAR.

### 1.1. Principios de la tecnología LiDAR

LiDAR es el acrónimo para Light Detection and Ranging. También puede encontrarse referencias al LiDAR como "laser scanning" or LaDAR (Laser Detection and Ranging) (Wehr and Lohr, 1999). Se trata de un sistema activo de teledetección, es decir, utiliza su propia fuente de energía, y se basa en el mismo principio básico utilizado por la tecnología radar, aunque empleando energía láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) en vez de energía emitida en la región de microondas. El principio de funcionamiento es relativamente sencillo pues un sensor LiDAR mide el intervalo de tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso láser y la recepción de un eco o retorno después de que dicho pulso láser incida sobre un objeto situado sobre la superficie terrestre. A partir del tiempo medido por el sensor es posible determinar la distancia entre el sensor y dicho objeto a partir de la siguiente ecuación:

$$R = c \frac{t}{2} \quad (1)$$

Donde R es la distancia entre el sensor y el objeto (m), t es el intervalo de tiempo medido por el sensor (s) and c es la velocidad de la luz (aproximadamente  $300.000 \text{ km s}^{-1}$ ) (Baltsavias, 1999). Basándose en este principio de medida, los sistemas LiDAR son capaces de generar una densa nube de puntos en 3 dimensiones que permiten describir detalladamente la superficie del terreno escaneado por el sensor. Para calcular las coordenadas (X, Y, Z) del punto donde se refleja el pulso laser emitido es necesario combinar la información proporcionada por los siguientes sub-sistemas que componen el sistema LiDAR: la unidad de medida de distancias láser, el escáner y la unidad de control y procesamiento (figura 1) (Wehr and Lohr, 1999).

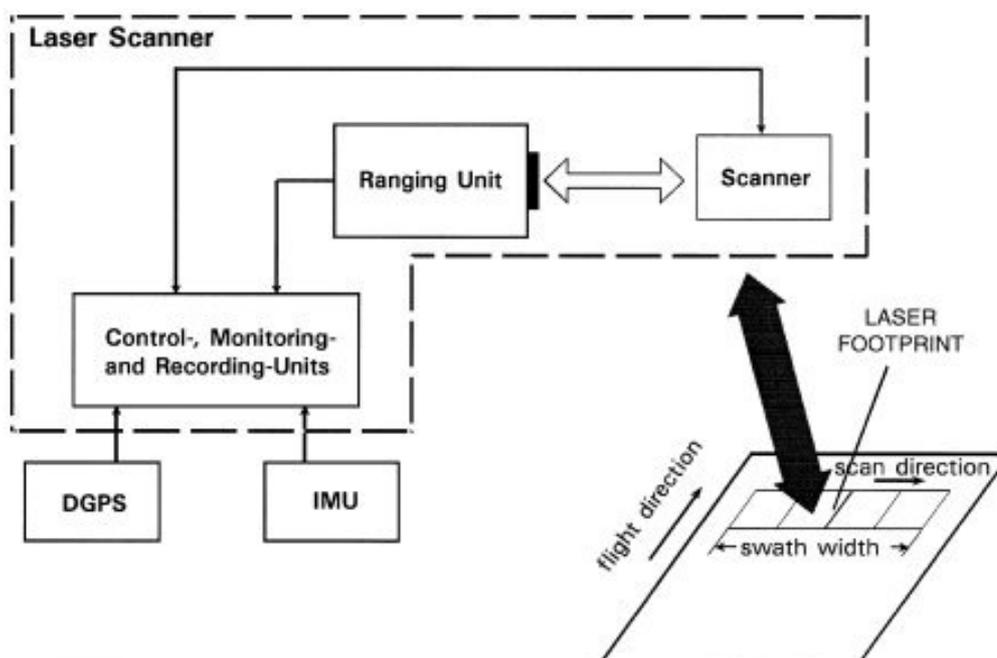


Figura 1. Componentes de un sistema LiDAR (tomado de Wehr y Lohr, 1999)

La unidad de medida de distancias comprende el emisor láser y el receptor electro-óptico, los cuales comparten el mismo camino óptico asegurando así que el objeto iluminado por el láser está dentro de campo de visión (Field Of View- FOV) del receptor. Normalmente el escáner distribuye el rayo láser de manera perpendicular a la dirección de vuelo mientras que la segunda dimensión se realiza por el movimiento del avión. Por su parte, la unidad de control y procesamiento incluye el sub-sistema formado por el sistema de posicionamiento global y la unidad de medida inercial (GPS/IMU), lo que permite determinar la posición y orientación del sensor. Los distintos sub-sistemas que componen el sistema LiDAR producen, de manera asíncrona, un conjunto de datos que son marcados con el tiempo de adquisición y son posteriormente almacenados por la unidad de control y procesamiento. Los datos de cada una de estas fuentes son enlazados posteriormente utilizando dichas marcas durante la fase de post-proceso para obtener las coordenadas X, Y, Z del punto.

Las propiedades físicas de los sistemas LiDAR se caracterizan por los siguientes parámetros: la longitud de onda del láser ( $\lambda$ m), la duración del pulso (ns), la energía del pulso ( $\mu$ J), la velocidad de emisión de pulsos (kHz), la anchura del pulso (mrad), el ángulo de escaneo (deg), la velocidad de escaneo (Hz), la altura de vuelo (m) y el tamaño de la huella sobre el terreno (m) (Baltasvias, 1999).

A pesar de los sistemas LiDAR son capaces de determinar las coordenadas de los puntos de reflexión con mucha precisión, existen varias fuentes de error que afectan a la precisión con la que se determina la posición de los puntos. En términos generales estas fuentes de error se pueden agrupar en (Husing and Gomes Pereira, 1998; Maas, 2001):

- Errores de alineación entre el sistema láser, el avión y el sistema de navegación, que causarán errores sistemáticos en los datos.
- Precisión en la determinación de la distancia. Este error se propaga fundamentalmente en la coordenada Z.

- Error del espejo, causado principalmente por problemas mecánicos (vibraciones y oscilaciones), y se transmite en mayor medida a las coordenadas planimétricas.
- Errores del sistema GPS/INS. Puede considerarse como la mayor fuente de error, causando errores en las coordenadas finales comprendidos entre los 10 a 20 centímetros en altitud y hasta 50 centímetros en X e Y.

Además de las coordenadas del punto donde se refleja el pulso láser emitido, los sistemas LiDAR registran la intensidad de cada uno de los retornos, la cual representa la cantidad de energía reflejada. La energía recibida depende de las propiedades del sistema LiDAR, el ángulo de incidencia, la reflectividad del objeto sobre el que incide el pulso, la absorción atmosférica y la distancia sensor-objeto (Coren and Sterzai, 2006). A consecuencia de estos factores, la intensidad puede variar entre distintas adquisiciones, regiones o incluso a lo largo de la misma línea de vuelo. Por tanto, de cara a comparar los valores de intensidad entre distintos sensores, líneas de vuelo o campañas de adquisición, la intensidad debe corregirse de efectos atmosféricos, el efecto de la distancia, la energía del pulso y el ángulo de incidencia si la campaña de adquisición ha incluido varios ángulos de campo de visión, o frecuencias de emisión de pulsos (Vain et al., 2010). La mayoría de los sistemas comerciales registran pulsos discretos y no proporcionan información sobre los algoritmos empleados para detectar los pulsos, de manera que la intensidad puede corresponder a la intensidad máxima registrada en un intervalo de tiempo o la integrar de la energía registrada en dicho intervalo (Höfle and Pfeifer, 2007).

## **1.2. Clasificación de los sensores LiDAR**

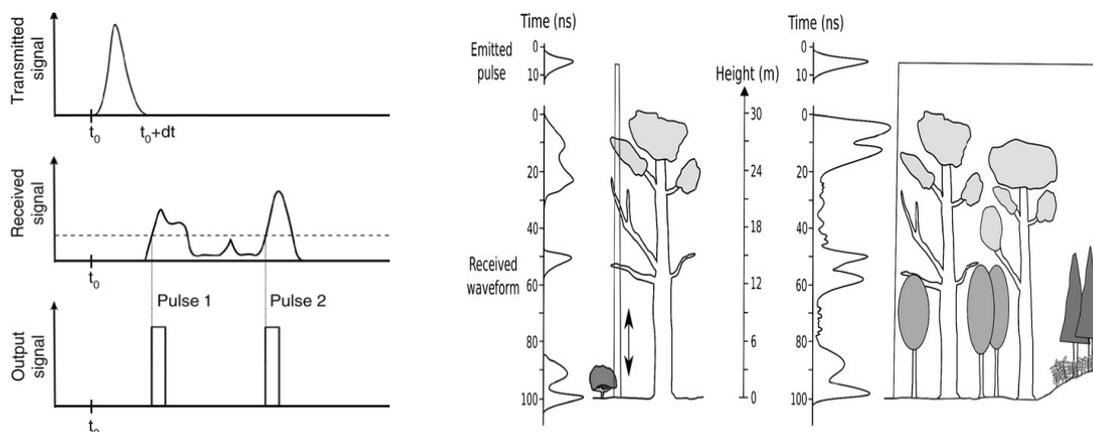
La clasificación de los sensores LiDAR puede hacerse atendiendo a varios criterios. Así, un primer criterio clasifica los sensores en función del tipo de superficie a medir, considerando sensores topográficos, sensores batimétricos y sensores atmosféricos. Los primeros suelen operar en la región del infrarrojo cercano (700-1300 nm) mientras que los empleados para aplicaciones batimétricas o atmosféricas se emplean sistemas que trabajan con dos longitudes de onda, una en el infrarrojo cercano y otra en la región del verde (500-600 nm).

De acuerdo al principio de medida de distancias empleado, podemos considerar dos grupos en función del método empleado para determinar el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso y su retorno. El primer método, más directo, consiste en medir el tiempo transcurrido desde la emisión de un pulso hasta su recepción mediante relojes ultra-precisos, y es empleado por la mayoría de los sistemas comerciales. El segundo se basa en determinar la diferencia de fase entre el pulso emitido y el recibido. En este caso el tiempo empleado por el pulso en recorrer la distancia sensor-objeto es directamente proporcional a la diferencia de fase observada.

Un tercer criterio para clasificar los sistemas LiDAR es en base a la plataforma sobre la que va instalado el sensor. Así por ejemplo, podemos encontrar sistemas terrestres, sistemas aeroportados y sistemas a bordo de satélite. Más recientemente, se han desarrollado sistemas montados sobre vehículos denominados sistemas LiDAR móviles (VLS) (Lin et al., 2010). Estos sistemas son una variación de los sistemas terrestres, montados sobre vehículos, vagones o furgonetas, lo que les proporciona más flexibilidad.

El cuarto criterio para clasificar los sistemas LiDAR se basa en las capacidades de registro de los sistemas. Siguiendo este criterio, podemos clasificar los sistemas en sensores discretos y sensores de huella continua (figura 2). El primer grupo graba retornos discretos (primeo y

último, o retornos múltiples - hasta 5) por cada pulso emitido, mientras que el segundo grupo de sensores digitizan toda la energía que es devuelta hacia el sensor por los distintos objetos situados en el camino óptico del pulso emitido.



**Figura 2. Izquierda: señal emitida y recibida (primer y último retorno) para un sensor discreto. Centro: Onda digitizada en una zona arbolada utilizando un sistema de huella pequeña. Derecha: Onda digitizada para un sistema de huella grande (adaptado de Mallet and Bretar ,2009).**

De acuerdo al tamaño de la huella, podemos clasificar los sensores como sistemas de huella pequeña (varios centímetros), y sistemas de huella grande (hasta varios metros). El tamaño de la huella es un parámetro crítico que determina el área de muestro del sobre el terreno o lo que es lo mismo la proyección sobre el terreno del campo instantáneo de visión (Instantaneous Field Of View –IFOV) del sensor, esto es, la resolución.

## 2 Identificación y propuesta de variables a obtener a partir de datos LiDAR y metodologías de obtención

Los sistemas LiDAR son capaces de proporcionar densas nubes de puntos en tres dimensiones proporcionando información horizontal y vertical con una alta resolución espacial y precisión describiendo detalladamente la superficie terrestre, y por tanto permiten obtener atributos forestales (Lim et al., 2003; Wang and Glenn, 2008). Entre los atributos que pueden obtenerse a partir de los datos LiDAR podemos citar la altura del dosel, la topografía subyacente al dosel, la biomasa aérea, área basimétrica, diámetro medio del tronco, volumen de copa o distribución vertical de los doseles (Dubayah and Drake, 2000; Harding et al., 2001; Lefsky et al., 1999; Næsset, 1997; Naesset and Bjercknes, 2001; Nelson et al., 1984; Nelson et al., 2003; Ritchie et al., 1993). Algunos de estos atributos pueden obtenerse de manera directa a partir de los datos (X, Y, Z) proporcionados por los sistemas LiDAR como por ejemplo la altura de la vegetación; otros se obtienen de manera indirecta mediante el establecimiento de modelos estadísticos o relaciones empíricas. A pesar de que, como se ha mencionado, algunas variables se obtienen de manera relativamente directa, es necesario un pre-procesamiento de los datos que incluye el filtrado de los puntos (normalmente identificación de retornos correspondientes a suelo y de retornos sobre objetos situados sobre el terreno como mínimo), la generación de un modelo digital de elevaciones (MDE), y normalización de las alturas de cada retorno con respecto al terreno por ejemplo.

La estimación de las diversas características forestales a partir de datos LiDAR puede realizarse siguiendo dos enfoques distintos en función de la densidad de los datos empleados. El primer enfoque consiste en trabajar a nivel de árbol individual, el cual requiere datos con alta densidad de puntos, mientras que el segundo se basa en estimaciones a nivel de área a partir de la distribución de alturas de los retornos del dosel empleando datos con baja densidad de puntos (Packalén et al., 2008). La principal diferencia entre estos dos enfoques consiste en que el primero se apoya en la detección y delineación de árboles individuales y la aplicación de ecuaciones alométricas a nivel de árbol mientras que el segundo emplea directamente los retornos dentro de una parcela, rodal o masa arbórea para establecer relaciones que permitan estimar las características de interés. Según Hyypä and Inkinen (1999), para una delineación exitosa de los árboles individuales se requieren densidades de puntos de 5-10 puntos  $m^{-2}$ . Sin embargo, puesto que las densidades manejadas para grandes áreas oscilan entre 0.5 y 3 puntos  $m^{-2}$  en estos casos se opta por el segundo enfoque. Además, los métodos basados en árboles individuales tienen el principal inconveniente de que sólo los árboles dominantes o aquellos árboles aislados se pueden identificar correctamente.

Con respecto al tratamiento de los datos podemos considerar otros dos enfoques en función de cómo se sintetice la información proporcionada por los sistemas LiDAR. El primero consiste en derivar variables a partir de funciones de distribuciones de alturas derivadas de la nube de puntos, mientras que el segundo consiste en sintetizar la información mediante la generación de capas ráster. El segundo enfoque tiene la principal ventaja de que se reduce considerablemente el volumen de datos y por tanto, el tiempo de procesamiento, lo que es de gran interés para grandes áreas. Como inconveniente, se produce una pérdida de información disponible.

Diversos estudios han demostrado que la precisión de los distintos enfoques considerados en los párrafos anteriores para la estimación de características como la altura de la vegetación son similares (Hollaus et al., 2006; Packalén et al., 2008).

Entre los parámetros forestales que es posible derivar a partir de los datos proporcionados por Tragsatec se han seleccionado la altura del dosel, el porcentaje de copa y la estructura vertical del dosel.

A continuación se describirán algunas de las variables que pueden derivarse a partir de los datos LiDAR así como los métodos empleados para su estimación, centrándonos en métodos basados en área utilizando modelos digitales de altura del dosel debido a sus ventajas para procesar grandes volúmenes de datos.

### ***2.1. Metodologías para la estimación de la altura del dosel***

La altura del dosel es una de las medidas fundamentales en un inventario forestal y es una variable crítica para una estimación cuantitativa de otras variables de gran importancia como la biomasa, contenido de carbono, crecimiento o la productividad (Andersen et al., 2006). En el contexto forestal, la altura se define como la “distancia vertical entre el terreno y el ápice del árbol” (Husch et al., 1972 en Andersen et al. 2006).

Numerosos estudios han demostrado la capacidad de los sistemas LiDAR para estimar la altura de la vegetación (Andersen et al., 2006; Næsset, 1997; Næsset and Bjercknes, 2001; Popescu et al., 2002; Zimble et al., 2003). Los métodos desarrollados pueden agruparse en dos grandes categorías: a) métodos directos y b) métodos indirectos. En el primer caso la obtención de la altura de la vegetación a partir de datos LiDAR se realiza de una manera sencilla a partir de la resta del MDE con respecto al MDS. De esta manera se obtiene lo que generalmente se llama modelo digital de la altura del dosel (MDAD) o digital canopy height model (DCHM), que representa la altura de la vegetación en cada píxel:  $MDAD = MDS - MDE$ . Por su parte, los métodos indirectos estiman la altura de la vegetación a partir del establecimiento de modelos estadísticos que relacionan los datos LiDAR (variables independientes del modelo) con la altura de la vegetación (variable dependiente). Estos últimos requieren abundante trabajo de campo para obtener un número suficiente de datos que permitan calibrar y validar los modelos.

En ambos casos, para la estimación de la altura de la vegetación a partir de datos LiDAR se aplica un umbral para garantizar que los puntos o píxeles empleados corresponden al dosel y no a suelo, piedras o vegetación baja. Este umbral suele establecerse en 2 m (Hollaus et al., 2006; Næsset, 1997), aunque en otros estudios, la separación entre arbolado y matorral se ha establecido en 4 m (García et al., 2011). En ocasiones también se ha establecido en función de las alturas de la base de copa medidas en campo (García et al., 2010).

Entre los métodos mencionados para estimar la altura del dosel, nos centraremos en la primera categoría por su sencillez y su idoneidad para estimar variables para grandes áreas debido al gran volumen de datos que se deben manejar.

Las siguientes figuras muestran el flujo para obtener el MDAD. Los datos empleados corresponden a los datos de muestra con una densidad de 5 puntos  $m^{-2}$ . Estos modelos se obtienen mediante interpolación a partir de la selección de puntos dentro de una cuadrícula de tamaño especificado por el usuario. Estos puntos pueden representar puntos clasificados como retornos producidos sobre el suelo desnudo (MDE) o bien a partir del punto más alto dentro de una celda (MDS)

### 1.- Modelo digital de elevaciones

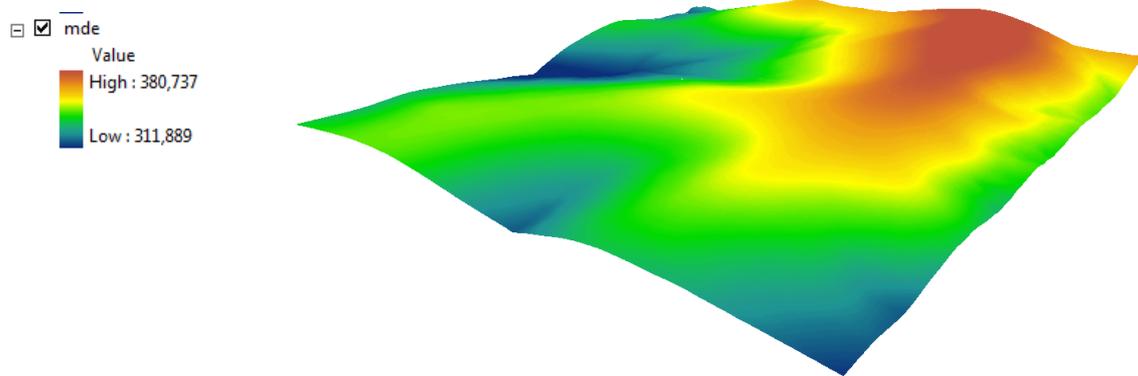


Figura 3. Modelo digital de elevaciones (MDE) generado a partir de los puntos terreno

### 2.- Modelo digital de superficie

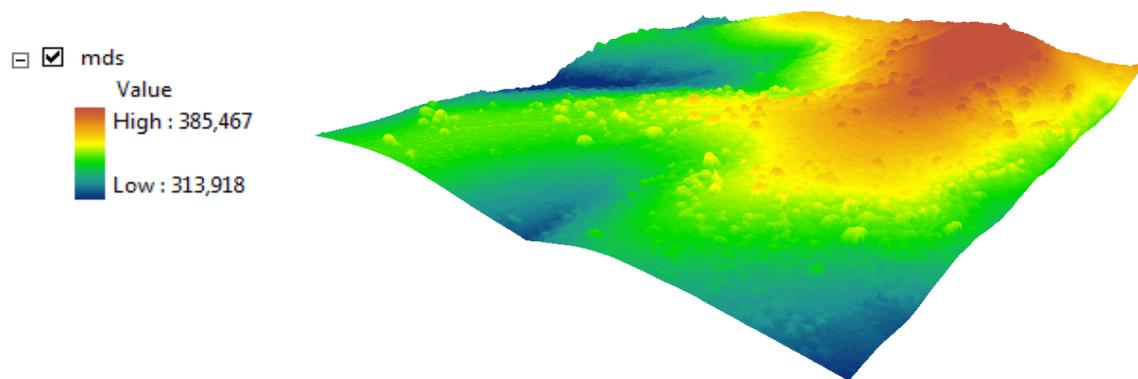
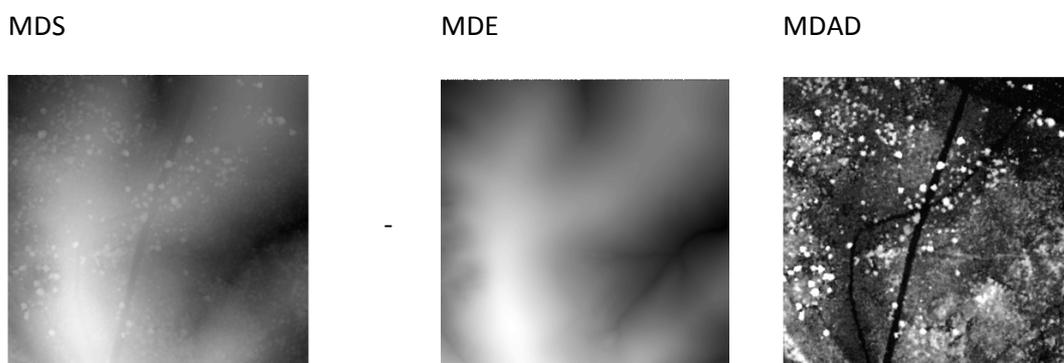


Figura 4. Modelo digital de superficie (MDS) generado a partir de los puntos de vegetación

3.- Restando el MDE al MDS se obtiene el MDAD



**Figura 5. Generación del modelo digital de alturas del dosel (MDAD) a partir del MDS y el MDE**

En ocasiones se obtienen valores negativos para el MDAD que deben eliminarse puesto que representan errores. En este ejemplo los valores para el MDAD oscilan entre -0,15 y 13,10 m. Estos valores negativos pueden deberse a los efectos de la interpolación en la generación de los modelos digitales o errores en la clasificación de los puntos. En este caso, los valores negativos aparecieron principalmente en zonas de suelo desnudo (caminos) y pastizales (puntos blancos en la siguiente figura), con valores de -0,15 que están dentro de la precisión nominal de los datos de acuerdo a la información proporcionada por la empresa adjudicataria del vuelo.



**Figura 6. Izquierda: Ortofotografía en color natural. Derecha: máscara de valores negativos en el MDAD (píxeles blancos)**

Para filtrar estos valores negativos se aplica una máscara y se reclasifican a 0. El resultado final se muestra en la siguiente figura con una ortofotografía de la zona de estudio superpuesta sobre el MDAD).

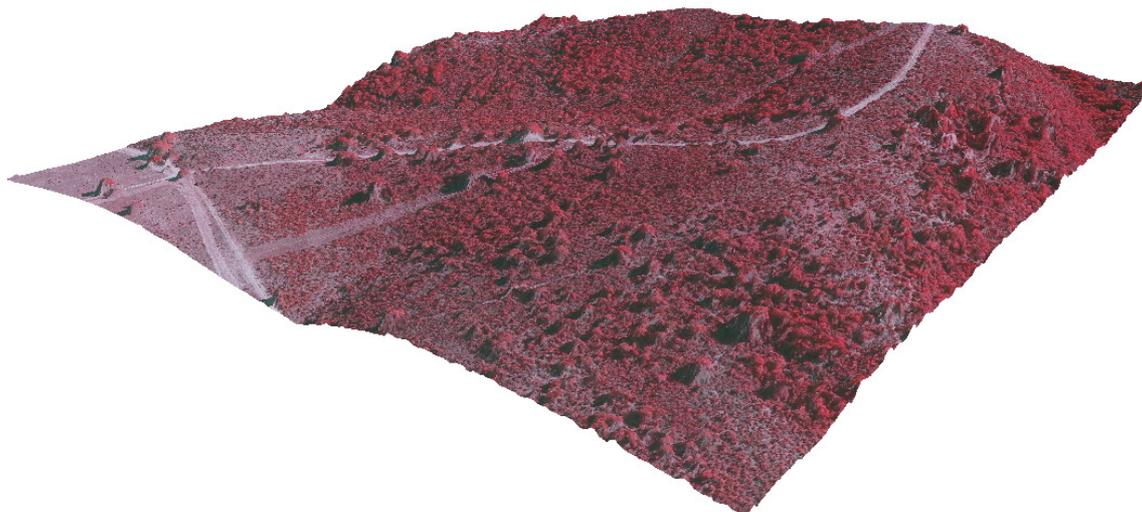


Figura 7. MDAD corregido. Se ha superpuesto la ortofotografía en falso color (R: NIR; G: Rojo; B: Azul)

### 2.1.1. Precisión en las estimaciones de las alturas de la vegetación. Orientación para la interpretación de los resultados.

La capacidad de los sistemas LiDAR para medir con precisión la altura de la vegetación depende de varios factores como son el tamaño y la reflectividad del objeto sobre el que incide el pulso, la densidad de los datos, el diámetro del pulso, o el método de detección de cada retorno (Baltasvías, 1999). Además de estos factores relacionados con el sistema, la precisión en la estimación de las alturas depende de otros factores como las especies, la forma de las copas (Hyypä et al., 2004), así como los errores en la generación del MDS y el MDE ya que los errores se propagarán directamente al MDAD (Hollaus et al., 2006). Así, por ejemplo, Leckie et al., (2003) encontraron errores de hasta 0,5 m debidos al micro-relieve y vegetación baja. Por tanto, aunque los errores obtenidos con modelos generados a partir de datos de alta densidad serán, por norma general, menores de 0,3 m (Reutebuch et al., 2003), es importante considerar la contribución de esta fuente de error en los errores totales a la hora de determinar la altura del dosel.

En la mayoría de los trabajos, se ha manifestado una clara tendencia a infraestimar la altura de la vegetación, especialmente en el caso de las coníferas. Esto normalmente se explica por la baja probabilidad de que el pulso emitido por el láser incida sobre la copa del árbol (figura 8), especialmente cuando la densidad de puntos de los datos es baja.

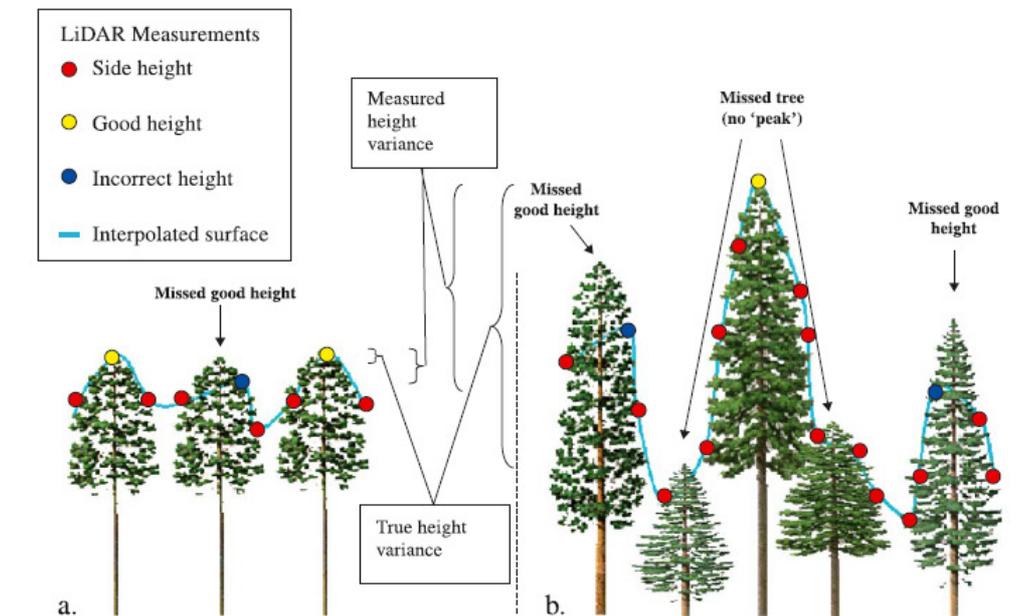


Figura 8. Errores debidos al fallo en el registro con los datos LiDAR del ápice del árbol (tomada de Zimble et al., 2003)

Aunque el empleo sistemas con huella grande aumentaría la probabilidad de que se produjese un retorno sobre el punto más alto de la copa del árbol, en este caso la cantidad de energía por unidad de área, debido a que la misma cantidad de energía se distribuye en un área mayor, disminuyendo la probabilidad de registrar la reflexión asociada con un ápice pequeño de manera que la energía devuelta no superaría el umbral de ruido (Andersen et al. 2006). Otro factor que contribuye a esta infraestimación es el hecho de que cuando el pulso láser incide sobre el dosel, una parte de la energía penetrará a través del mismo hasta que la cantidad de energía devuelta al sensor supere el umbral de ruido. Esta profundidad de penetración del pulso dependerá de características estructurales (densidad del dosel, reflectividad, ángulo de inclinación de las hojas, etcétera). Gaveau y Hill (2003) encontraron distinta infraestimación para matorral y para arbolado.

En cuanto a la magnitud de los errores observados la siguiente tabla muestra algunos ejemplos:

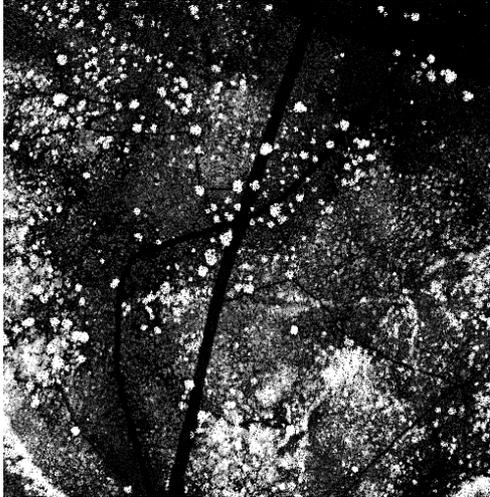
**Tabla 1: ejemplos de errores obtenidos en la determinación de la altura de la vegetación**

Autor	Año	Error manifestado	
Andersen et al.	2006	Alta densidad de puntos (6 p m <sup>-2</sup> ): $-0,73 \pm 0,43$ m	
		Baja densidad de puntos (6 p m <sup>-2</sup> ): $-1,12 \pm 0,56$ m	
Gaveau and Hill	2003	Arbolado:	Nube de puntos: $-1,27 \pm 0,94$
			MDAD: $-2,12 \pm 1,24$
		Matorral:	Nube de puntos: $-0,91 \pm 0,50$
			MDAD: $-1,02 \pm 0,46$
Hyypä et al.	2001	Media: 1, 8	
Naesset y Bjerkness	2001	$0,23 \pm 0,56$	
Persson et al.	2002	Diámetro de huella pequeño (0,26 m): RMSE= 0,65	
		Diámetro de huella grande (3,68 m): RMSE= 0,76	
Yu et al.	2004	$-0,2 \pm 0,74$	
Maltamo et al.	2004	$-0,65 \pm 0,49$	
Hollaus et al.	2006	Coeficiente de determinación: $R^2 = 0,73-0,84$	
Andersen et al.	2005	Coeficiente de determinación: $R^2 = 0,98$ ; RMSE= 1,3	

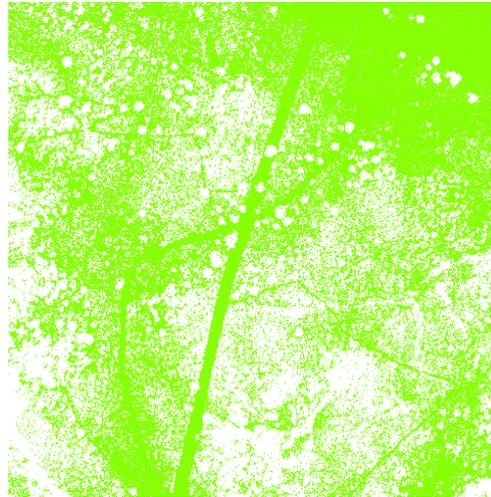
**Nota: las magnitudes del error mostradas están afectadas por la magnitud de las alturas medidas**

La altura media del dosel y la desviación estándar se han mostrado como variables importantes para sintetizar la estructura forestal. En este sentido la altura media puede calcularse para todos los tipos de vegetación dentro de una tesela determinada o bien, obtenerla por estratos dentro de dicha tesela. El siguiente ejemplo muestra la altura media obtenida para los distintos estratos vegetales de una zona. En este ejemplo se ha considerado que la zona representa una tesela heterogénea donde se encuentran pasto, matorrales y arbolado. La siguiente figura muestra la zona seleccionada y las máscaras correspondientes a cada estrato de vegetación: pasto (0-0,5 m); matorral (0,501- 2,0 m) y arbolado (>2,0 m).

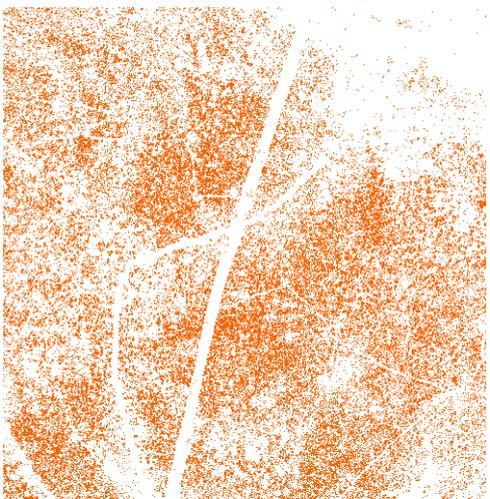
Modelo digital de vegetación



Máscara para pastos



Máscara para matorrales



Máscara para arbolado



**Figura 9. Modelo digital de vegetación y máscaras generadas a partir de él para determinar los distintos estratos de vegetación presente en la zona de estudio.**

La siguiente tabla muestra las alturas medias obtenidas para cada estrato de vegetación dentro de la zona considerada.

Tabla 2: Altura media para cada estrato de vegetación

Altura media pasto (m)	Altura media matorral (m)	Altura media arbolado (m)
0,11	1,07	3,50

En el caso del pasto debe tenerse en cuenta que la máscara se creó incluyendo la altura 0, es decir, lo que correspondería a suelo desnudo, lo que podría introducir error en el cálculo. Además, debemos tener en cuenta que la precisión del sistema a la hora de obtener las coordenadas es de 15 cm en Z, por tanto, para evitar estos errores, podría generarse la máscara correspondiente a pasto considerando el intervalo 0,15 a 0,5 m.

De cara a validar los resultados obtenidos, es necesario realizar medidas en campo sobre una muestra representativa que nos permita determinar la calidad de nuestras estimaciones. En la sección 2.4 se describen métodos de campo empleados para la medición de la altura de la vegetación.

### 2.3. Metodologías para la estimación del porcentaje de copa

El porcentaje de copa (%<sub>copa</sub>) o fracción de cabida cubierta (FCC), representa la proporción de suelo que es cubierto por la proyección vertical de las copas de los árboles, y por tanto, permite determinar la densidad y distribución horizontal de la vegetación. El %<sub>copa</sub> está relacionado con la proporción de huecos en el dosel (ecuación 2):

$$\%_{\text{copa}} = 100 - \%_{\text{huecos}} \quad (2)$$

El porcentaje de copa afecta, por tanto, a distintos aspectos ecológicos como el régimen de luz del sotobosque, la humedad del suelo, el microclima (Page and Cameron, 2006); y es empleado junto con la altura de la vegetación para el seguimiento de espacios incluidos en la red Natura2000 (Holmgren et al., 2008). El %<sub>copa</sub> también afecta significativamente al desarrollo potencial y la propagación de un incendio de copa, por lo que se emplea, junto con la altura de la base de las copas para simular el comportamiento de los incendios (García et al., 2011b).

Los sistemas LiDAR han mostrado un gran potencial para estimar %<sub>copa</sub> empleando dos enfoques distintos. El primero se basa en la proporción de retornos de vegetación con respecto al total de retornos (ecuación 3) y ha sido ampliamente utilizado a partir de datos proporcionados por sistemas LiDAR aeroportados (García et al., 2010; Morsdorf et al., 2006; Riano et al., 2004):

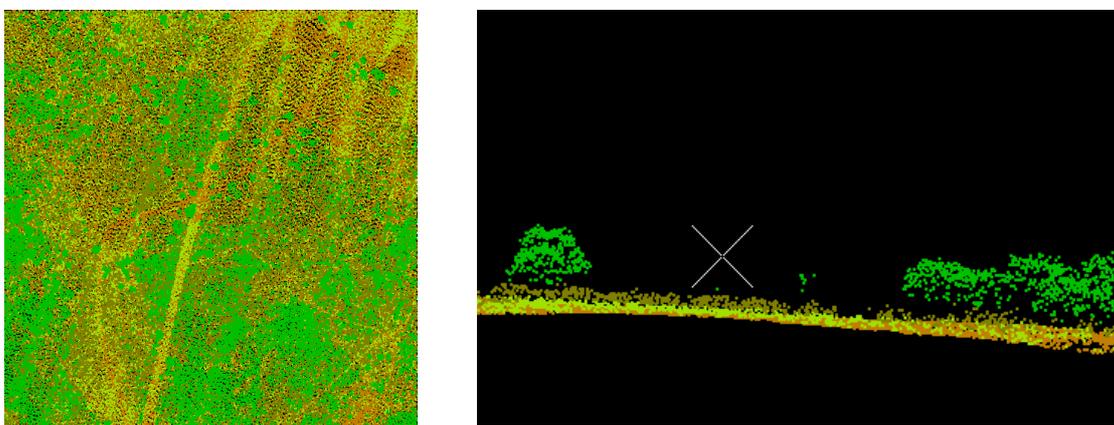
$$\%_{\text{copa}} = \left( \frac{\text{Retornos}_{\text{dosel}}}{\text{Total Retornos}} \right) * 100 \quad (3)$$

El segundo se basa en determinar el %<sub>copa</sub> como el porcentaje de píxeles ocupados por el dosel con respecto al total de píxeles (ecuación 4). Este último enfoque es equivalente al enfoque empleado a partir de datos ópticos, considerando una imagen binaria de píxeles que contienen retornos y píxeles que no contienen retornos en el dosel. Este enfoque fue empleado por García et al. (2011b) a partir de datos LiDAR obtenidos con un sistema LiDAR terrestre, y encontraron que la precisión de este método depende de la resolución empleada para generar las imágenes binarias de píxeles ocupados y píxeles vacíos.

$$\%_{\text{copa}} = \left( \frac{\text{Píxeles}_{\text{dosel}}}{\text{Total Píxeles}_{\text{plot}}} \right) * 100 \quad (4)$$

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo de %copa a partir de datos LiDAR sobre la zona considerada anteriormente. En este caso se considerará que los datos de muestra representan una tesela heterogénea del P.N. de Monfragüe. Se aplicarán los dos enfoques comentados anteriormente y se compararán los resultados.

La siguiente figura muestra los retornos clasificados en función de su altura sobre el terreno (izquierda) y un perfil transversal realizado sobre la zona considerada. En naranja se representan los puntos terreno, en verde claro los retornos considerados sobre vegetación baja (0 – 0,5 m), en verde oliva retornos sobre vegetación media (0,5-2,0 m) y en verde más oscuro los retornos sobre el dosel (> 2,0 m).



**Figura 10. Retornos clasificados en función de su altura sobre el terreno y perfil transversal donde se observan los distintos estratos de vegetación.**

Para obtener la altura de cada retorno con respecto al suelo es necesario restar a cada punto la altura del MDE en esa posición:

$$h_i = Z_i - Z_{\text{interpolada}} \quad (5)$$

Donde  $h_i$  es la altura del retorno con respecto al terreno,  $Z_i$  es la altitud del retorno y  $Z_{\text{interpolada}}$  es la altitud del MDE en la posición del punto considerado.

Considerando el primer enfoque la fracción de cubierta cubierta o % $_{\text{copa}}$  se obtiene a partir de la proporción de retornos sobre el dosel con respecto al total de retornos (ecuación 3), lo que en nuestro caso nos daría:

$$\%_{\text{copa}} = 20,33\%$$

También podemos determinar la fracción de cubierta correspondiente a otros estratos de vegetación como el matorral ( $0,5 < h \leq 2$  m), obteniendo un valor de:

$$\%_{\text{matorral}} = 24\%$$

Considerando el segundo enfoque, es necesario crear una imagen binaria donde los píxeles correspondientes a dosel tengan valor 1 y el resto tenga valor 0. La siguiente figura muestra una máscara de aquellos píxeles con una altura superior a 2 m y que, por tanto, se consideran como correspondientes al dosel, así como el número de píxeles con valor 1.

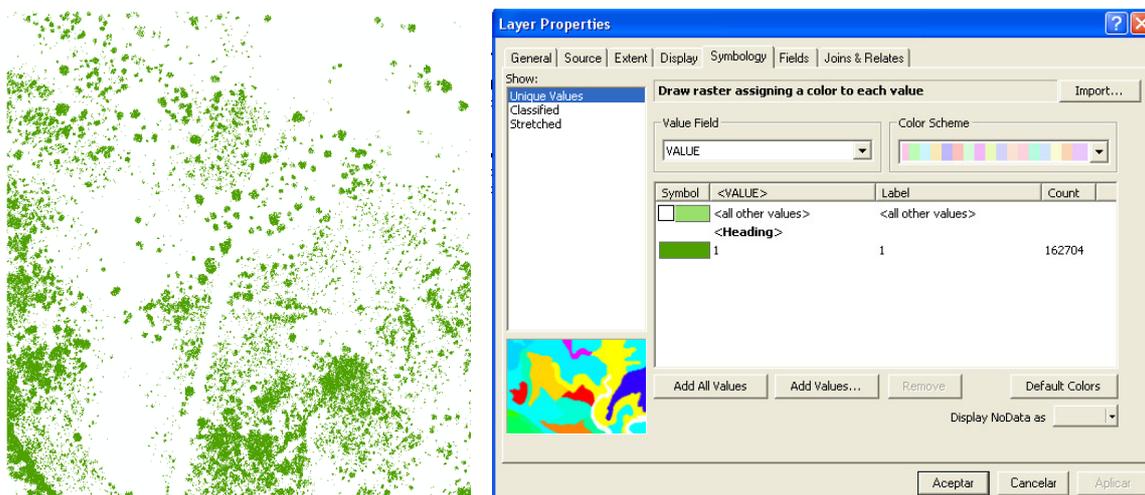


Figura 11. Imagen binaria de píxeles correspondientes al dosel ( $h > 2m$ ) y número de píxeles ocupados por dosel

En este caso, el %copa obtenido fue de 16,27%.

La siguiente figura muestra la máscara correspondiente a matorral y el número de píxeles con valor 1.

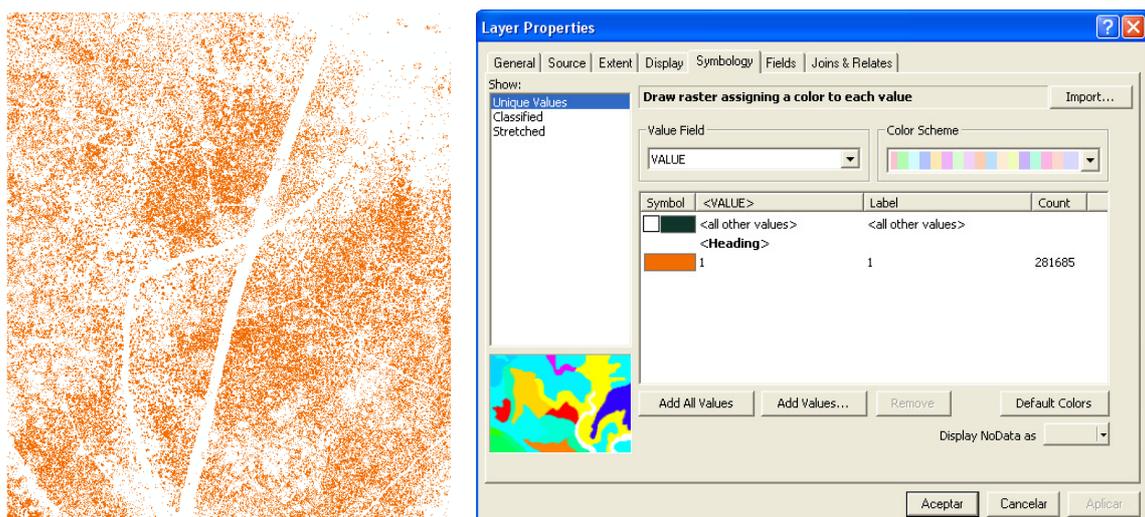


Figura 12. Imagen binaria de píxeles correspondientes al matorral ( $0,5 m \leq h \leq 2m$ ) y número de píxeles ocupados por dosel

El % de matorral obtenido siguiendo este enfoque fue de 28,16%

Como se comentó anteriormente, este enfoque tiene la principal ventaja de que se reduce considerablemente el volumen de datos y por tanto, el tiempo de procesamiento, lo que es de gran interés para grandes áreas. Por otro lado, hay que tener en cuenta que esta máscara se había generado anteriormente para calcular la altura media correspondiente a arbolado por lo que dicha máscara también permite calcular fácilmente el %<sub>copa</sub>.

Como podemos observar la diferencia entre ambos enfoques es de sólo 4%, sin embargo, en el caso del arbolado el segundo enfoque infraestima mientras que para el matorral lo sobreestima en la misma proporción. Esta diferencia entre ambos enfoques puede explicarse por los efectos de la interpolación llevada a cabo para generar el MDAD y por tanto, dependerá del método de interpolación aplicado en la generación del MDE y del MDS.

### 2.3.1. Precisión en las estimaciones del porcentaje de copa. Orientación para la interpretación de los resultados.

A pesar de que los sistemas LiDAR ofrecen un enorme potencial para estimar la fracción de cubierta, estas estimaciones no están exentas de error. En el caso del primer enfoque, basado en frecuencia de retornos, diversos estudios han mostrado una sobreestimación de la fracción de cubierta empleando los datos correspondientes sólo a los primeros retornos, puesto que se considera que todo el pulso ha sido ocupado por la vegetación, mientras que se ha observado una infraestimación a partir de segundos retornos (Lovell et al., 2003; Morsdorf et al., 2006). Por tanto, según Lovell et al. (2003) el valor real de la fracción de cubierta debe satisfacer la siguiente condición:

$$\%dosel_{1^{er} \text{ retorno}} > \%dosel_{real} > \%dosel_{\text{último retorno}}$$

Este valor real debe presentar una relación lineal con la frecuencia de los retornos. Por otro lado, factores relacionados con las características del instrumento, como el tamaño de la huella, el algoritmo de detección de cada retorno, o los efectos atmosféricos, también afectarán a las estimaciones. Para considerar estos factores, autores como Morsdorf et al., (2006) aplicaron una regresión lineal. Además estos autores probaron distintos tamaños de parcela para encontrar una relación óptima entre los datos LiDAR y las estimaciones de fracción de cubierta medida en campo mediante fotografía hemisférica.

Con respecto al segundo enfoque, García et al. (2011b) comprobaron que la precisión del método depende de la resolución empleada para crear las imágenes binarias de píxeles ocupados por dosel y píxeles vacíos. En este sentido, un píxel demasiado grande tiende a sobreestimar la fracción de cubierta puesto que el píxel se considerará que está totalmente ocupado por la vegetación, mientras que un píxel pequeño puede infraestimar la fracción de cubierta puesto que la distancia entre dos retornos puede ser mayor que la resolución del píxel.

La siguiente tabla muestra algunos resultados obtenidos por diversos autores:

**Tabla 3: Precisiones obtenidas en la determinación del porcentaje de copa**

Autor	Año	Error
Morsdorf et al.	2006	$R^2=0,37$ ; RMSE=0,18 para un tamaño óptimo de parcela con un radio = 2 m
Riaño et al.	2004	$R^2>0,9$ para un radio = 2,5 m
Hopkinson and Chasmer	2009	$R^2=0.75$
Holmgren et al.	2008	Arbolado RMSE=4.9% Arbolado y matorral: RMSE= 6.3%
García et al.	2011	RMSE= 15.81% para un tamaño de píxel de 3 cm. Estimado a partir de datos de LiDAR terrestre, con un diámetro de huella mucho menor que los sistemas aeroportados

De cara a validar los resultados obtenidos, es necesario realizar medidas en campo sobre una muestra representativa que nos permita determinar la calidad de nuestras estimaciones. En la sección 2.4 se describen métodos de campo empleados para la determinación de la fracción de cubierta.

#### ***2.4. Metodologías para la determinación de la estructura vertical del dosel***

La estructura vertical de la vegetación se define como “la configuración sobre el terreno, desde arriba hacia abajo, de la vegetación dentro de una masa forestal” (Brokaw and Lent, 1999). Por tanto, la estructura vertical representa la distribución de alturas dentro de una tesela o rodal.

Como se comentó anteriormente, la altura media del dosel y la desviación estándar se han mostrado como variables importantes para sintetizar la estructura forestal. De igual modo, el análisis de la varianza de la altura del arbolado se ha utilizado para detectar las diferencias entre bosques con una estructura simple (una sola capa de dosel) y una estructura más compleja (varias capas de dosel). Zimble et al., (2003) emplearon la varianza de las alturas de árboles individuales delineados a partir de datos LiDAR para determinar distintas clases estructurales en una zona de Idaho (USA). Las dos clases se establecieron a partir de observaciones en campo y se estableció un umbral de 1,54 m, de manera que aquellas parcelas con una varianza inferior a este valor se consideraron como parcelas de estructura simple y aquellas con un valor superior como parcelas de estructura compleja.

Otros autores han utilizado la desviación estándar de las alturas de los píxeles de un MDAD dentro de una celda de un determinado tamaño, como por ejemplo 30 m, para determinar la complejidad de la masa analizada (Maier et al., 2008; Pascual et al., 2010). En este caso, la desviación estándar representa la heterogeneidad de la superficie del dosel dentro de la celda considerar, no sólo la variación en las alturas de las copas de los árboles como en el caso de Zimble et al., (2003).

Además de la varianza o la desviación estándar también se ha propuesto utilizar el coeficiente de variación como variable para determinar la estructura vertical de la vegetación. El

coeficiente de variación se define como el cociente entre la desviación estándar y la media (ecuación 6):

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (6)$$

Las siguientes figuras muestran un ejemplo de medidas de dispersión calculadas sobre el MDAD generado anteriormente. Se muestran los cálculos empleando dos resoluciones como tamaño de salida, a 5 m y a 10 m. Puede observarse cómo a medida que aumenta el tamaño del píxel se suavizan los resultados, obteniéndose superficies más homogéneas.

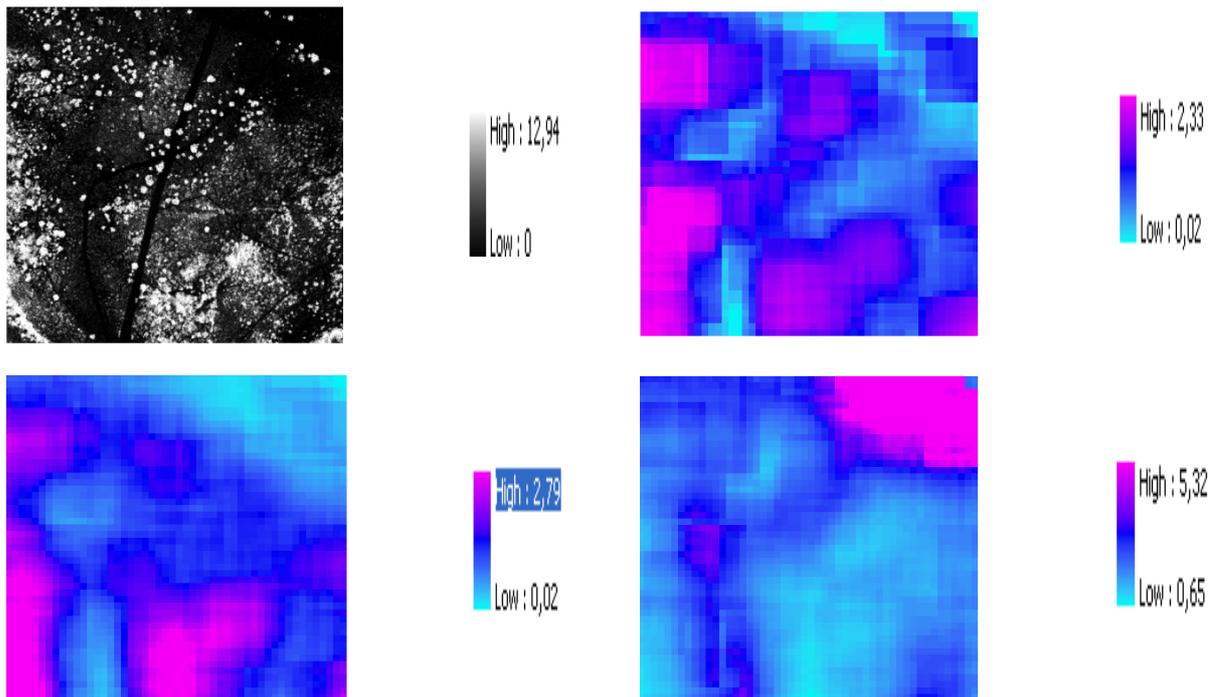
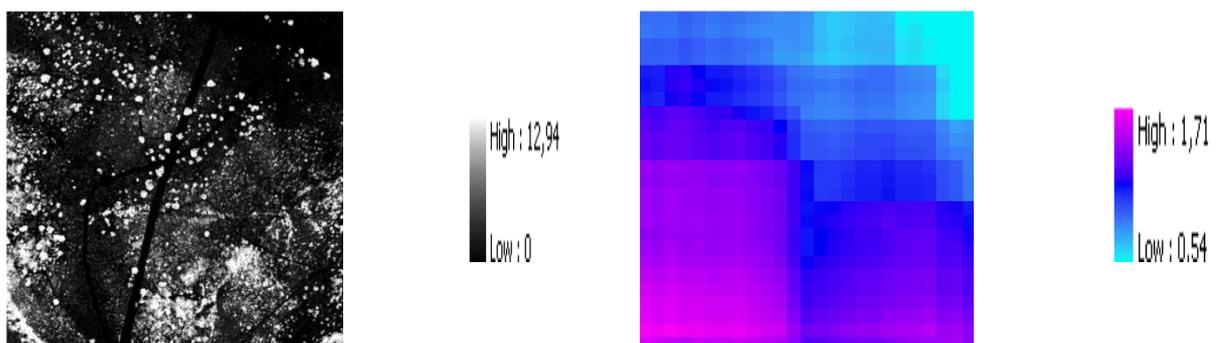
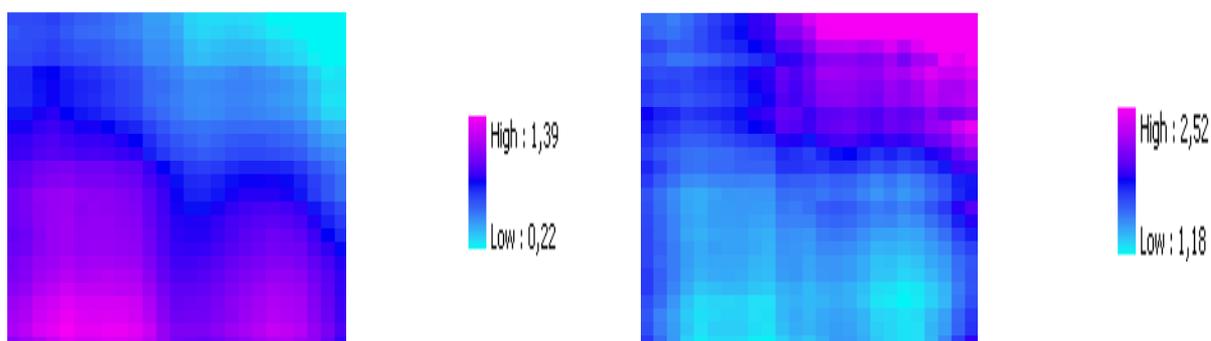


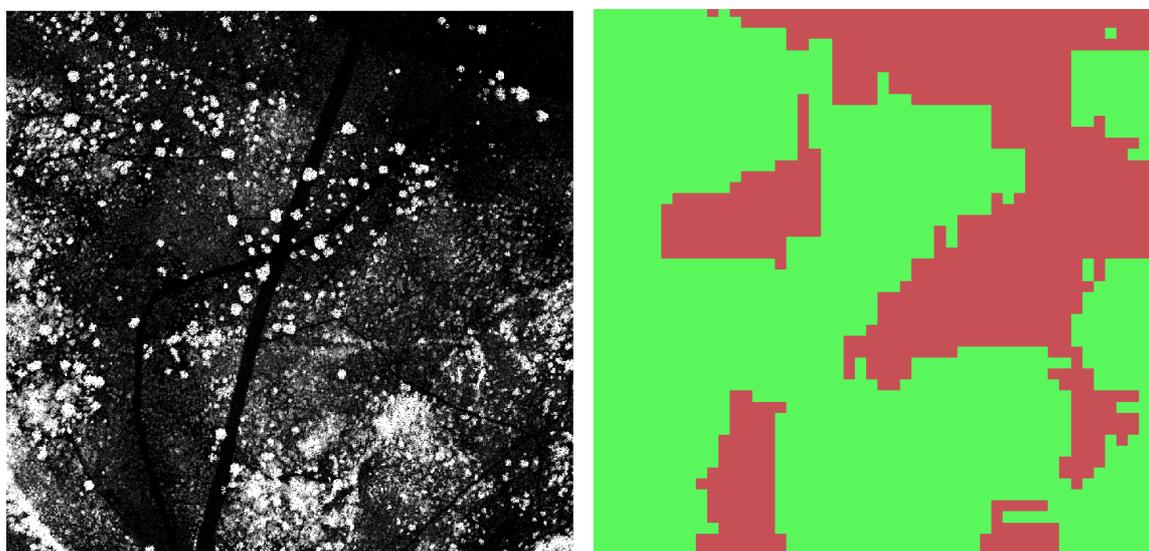
Figura 13. Modelo digital de alturas del dosel (arriba izquierda); desviación estándar de las alturas de la vegetación a 5 m (arriba derecha); media de las alturas de la vegetación a 5 m (abajo izquierda) y Coeficiente de variación de las alturas de la vegetación a 5 m (abajo derecha).





**Figura 14. Modelo digital de alturas del dosel (arriba izquierda); desviación estándar de las alturas de la vegetación a 10 m (arriba derecha); media de las alturas de la vegetación a 10 m (abajo izquierda) y Coeficiente de variación de las alturas de la vegetación a 10 m (abajo derecha).**

A partir de los valores anteriores pueden identificarse zonas con una estructura simple (por ejemplo: desviación estándar  $\leq 1$ ) o compleja (desviación estándar  $> 1$ ). Como puede comprobarse en la siguiente figura en la zona puede distinguirse aquellas zonas que presentan una estructura simple (marrón), principalmente las zonas de pastos y matorrales, de aquellas con una estructura más compleja (verde)



**Figura 15. Modelo digital de alturas del dosel (arriba izquierda); desviación estándar de las alturas de la vegetación a 10 m (arriba derecha); media de las alturas de la vegetación a 10 m (abajo izquierda) y Coeficiente de variación de las alturas de la vegetación a 10 m (abajo derecha).**

Si consideramos esta zona como una tesela, al igual que cuando se estimó la altura media, la desviación estándar de la misma sería de 1,34 y la varianza sería de 1,79. Si consideramos el umbral adoptado por Zimble et al. (2003) (varianza= 1,54) podría considerarse como una tesela de estructura compleja. Sin embargo, debemos tener en cuenta que estos umbrales

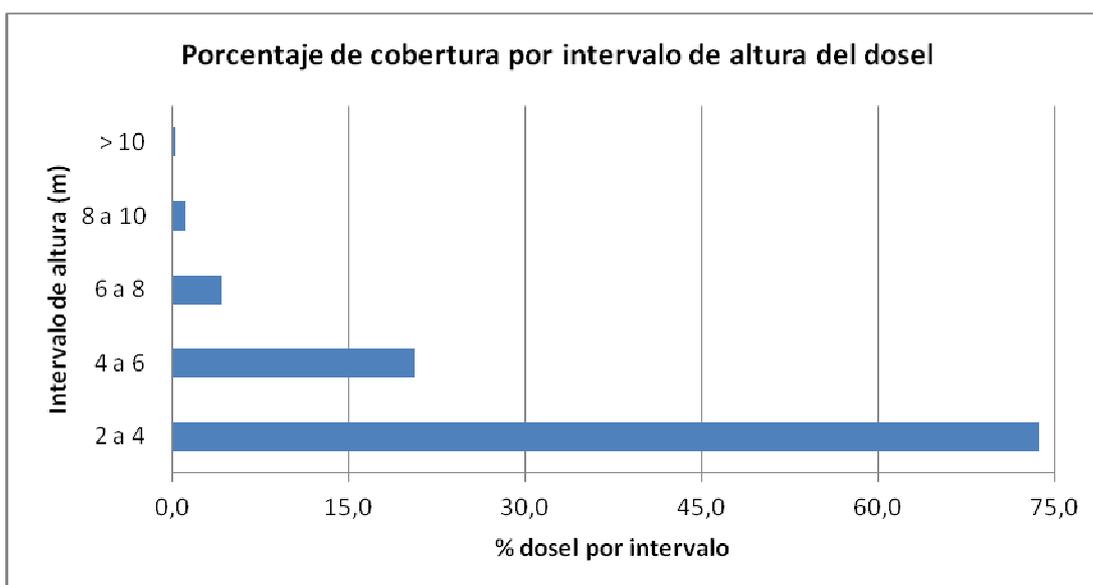
deberán establecerse en función de las características de la zona de estudio, a partir de las alturas de la vegetación medidas en campo.

Maier et al., (2008) también proponen determinar la estratificación de un bosque a partir del MDAD en función del porcentaje de cobertura del dosel a distintos intervalos de altura. En este caso, el porcentaje se calcula con respecto a la superficie total ocupada por dosel, no de la parcela o de la tesela. Así por ejemplo, ellos consideran que un bosque presenta un único estrato si una de las capas presenta un porcentaje de cobertura > 60% y ningún otro tiene un porcentaje de cobertura > 35%; tendrá dos estratos cuando hay dos estratos con un porcentaje de cobertura > 30% o uno con un porcentaje de cobertura > 50% y otro con un porcentaje de cobertura > 20%; y tendrá múltiples estratos cuando hay 3 estratos con un porcentaje de cobertura > 20%. Siguiendo este criterio, se aplicaron los siguientes umbrales para determinar los estratos de altura:

**Tabla 4: Porcentaje ocupado por cada intervalo de altura**

Estrato	Intervalo de altura (m)	Nº píxeles	%
1	2 - 4	119808	73,6
2	4 - 6	33677	20,7
3	6 - 8	6857	4,2
4	8 - 10	1871	1,1
5	> 10	491	0,3

Como vemos, los estratos 1 y 2 presentan un porcentaje de cobertura superior al 50% y el 20% respectivamente, por lo que puede considerarse que tenemos dos estratos. Estos resultados deben interpretarse con cautela puesto que los intervalos que 1 y 2 son intervalos consecutivos y por tanto, pueden no representar estratos diferentes. Esto puede comprobarse en la figura siguiente donde se observa una clara continuidad entre los estratos.



**Figura 16. Representación de la estructura vertical en función del porcentaje de cobertura del dosel por intervalo de altura.**

Otro aspecto a considerar al trabajar con MDAD es que no es posible identificar capas superpuestas puesto que estamos trabajando con una estructura 2.5D, por tanto, sólo será posible identificar niveles de alturas que puedan ser vistos desde arriba.

#### 2.4.1. Precisión en la determinación de la estructura vertical del dosel. Orientación para la interpretación de los resultados.

La determinación de la precisión de la determinación de la estructura vertical del dosel requiere disponer de datos de campo los cuales pueden basarse en medidas hechas en campo o a partir de una estimación visual de cada parcela. En este sentido es posible que la determinación de una estructura simple (una sola capa) se deba a una limitada penetración de los datos LiDAR en el dosel, lo que puede deberse a una densidad de puntos baja o bien un dosel muy denso que impide la penetración de los rayos láser emitidos por el sensor.

También debe tenerse en cuenta a la hora de analizar los distintos estratos las características de distribución de los retornos. Como se mencionaba en la sección anterior, la aplicación de umbrales puede indicar una determinada estructura, por ejemplo de múltiples capas, que en realidad corresponden a un único estrato. Así, los estratos 1 y 2 presentaban un porcentaje de cobertura superior al 50% y el 20% respectivamente, indicando la presencia de dos estratos si sólo se consideran los valores de los umbrales aplicados. Sin embargo, al observar el histograma de alturas o el porcentaje de cobertura de cada intervalo, se apreciaba una clara continuidad entre los estratos.

### 3 Métodos para la estimación de características forestales en campo

En este apartado se describen algunos métodos empleados para la estimación de la altura de la vegetación y de la fracción de cabida cubierta en campo.

#### 3.1. Estimación de la altura de la vegetación en campo

La medida directa de la altura de los árboles en campo presenta ciertas dificultades prácticas, por lo que normalmente se emplean métodos indirectos basados en la medida de ángulos a la base del árbol y el ápice del mismo, así como la distancia horizontal desde el punto de observación hasta el tronco del árbol. A partir de esto es posible aplicar fórmulas trigonométricas básicas que no permiten determinar la altura del árbol (ecuación 7):

$$h = hd(\tan\rho + \tan\theta) \quad (7)$$

Donde  $h$  es la altura estimada del árbol,  $hd$  es la distancia desde el punto de observación al tronco del árbol,  $\rho$  es el ángulo medido hasta el ápice del árbol y  $\theta$  es el ángulo medido hasta la base del mismo. La figura 17 muestra los ángulos y distancia empleados en la estimación de la altura del árbol.

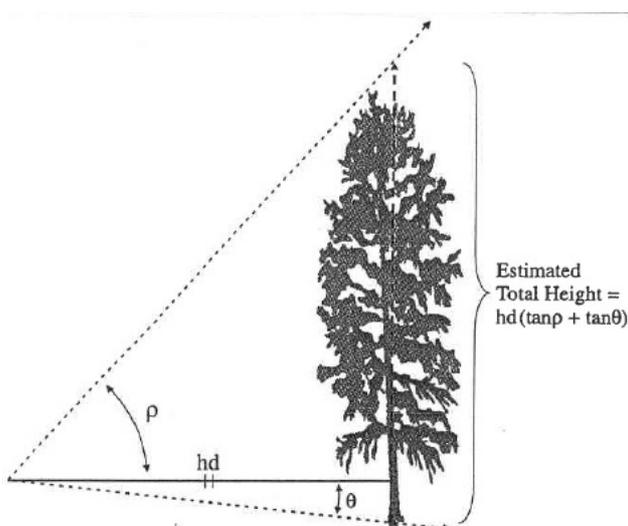


Figura 17. Representación de las medidas tomadas en campo para determinar la altura de los árboles.

Estos ángulos pueden medirse con inclinómetros o bien con sistemas láser portátil que miden distancias y ángulos. Estos últimos sistemas pueden medir las alturas con una precisión de hasta 1%-2% (Wing et al., 2004). Sin embargo este método requiere que puedan distinguirse claramente los ápices de los árboles, lo que resulta casi imposible en masas arbóreas muy densas donde no es posible ver claramente los ápices de los árboles (Andersen et al., 2006). Persson et al., (2002) indican que estos errores en las medidas de campo influyen en gran medida en el RMSE obtenido en las estimaciones hechas a partir de datos LiDAR.

Andersen et al., (2006) desarrollaron una técnica basada en métodos topográficos para estimar la altura de los árboles en campo mediante el uso de estación total. De esta forma fue posible comparar los métodos tradicionales descritos anteriormente con las estimaciones

hechas a partir de datos LiDAR y encontraron que las estimaciones hechas a partir de técnicas convencionales de campo presentaban mejores precisiones ( $-0,27 \pm 0,27$  m) que las estimaciones hechas a partir de datos LiDAR tomados con una alta densidad de puntos ( $-0,73 \pm 0,43$  m). De esta forma estos autores demostraron que las técnicas tradicionales empleadas en campo pueden servir para validar las estimaciones hechas a partir de datos LiDAR. La precisión ligeramente menor de las estimaciones basadas en datos LiDAR son compensadas sin embargo por la capacidad de estos sistemas para proporcionar observaciones continuas sobre áreas mayores que los métodos de campo.

Gaveau y Hill (2003) también propusieron un método basado en el empleo de estación total. Estos autores midieron directamente las coordenadas de diversos puntos de la superficie del dosel, no sólo sobre los ápices, para validar las medidas hechas a partir de datos LiDAR. Sin embargo, este método no resulta operativo para áreas amplias ya que implica el uso de grúas para poder colocar los prismas reflectores en los puntos de la superficie del dosel que se vayan a medir.

### ***3.2. Estimación del porcentaje de copa en campo***

La fracción de cabida cubierta, es decir, la proporción de suelo que es cubierto por la proyección vertical de las copas de los árboles, puede obtenerse a partir de métodos de datos tomados en campo aplicando diversos métodos. Entre los métodos más empleados destaca la fotografía hemisférica. La principal ventaja de la fotografía hemisférica sobre otros métodos indirectos como por ejemplo Licor LAI-2000 ([www.licor.com/env/newslines/tag/lai-2000/](http://www.licor.com/env/newslines/tag/lai-2000/)), basados en la proporción de radiación registrada sobre y bajo el dosel, es que proporciona un registro bidimensional permanente de la estructura del dosel.

Estas fotografías (figura 18) son tomadas desde el terreno hacia el dosel, situando la cámara nivelada sobre un trípode y mediante el empleo de una lente de ojo de pez, para ser posteriormente analizadas con software específico como Hemiview ([www.dekta-t.co.uk/products.html?product2005092818855](http://www.dekta-t.co.uk/products.html?product2005092818855)) o Gap Light Analyzer ([www.ecostudies.org/gla/](http://www.ecostudies.org/gla/)).

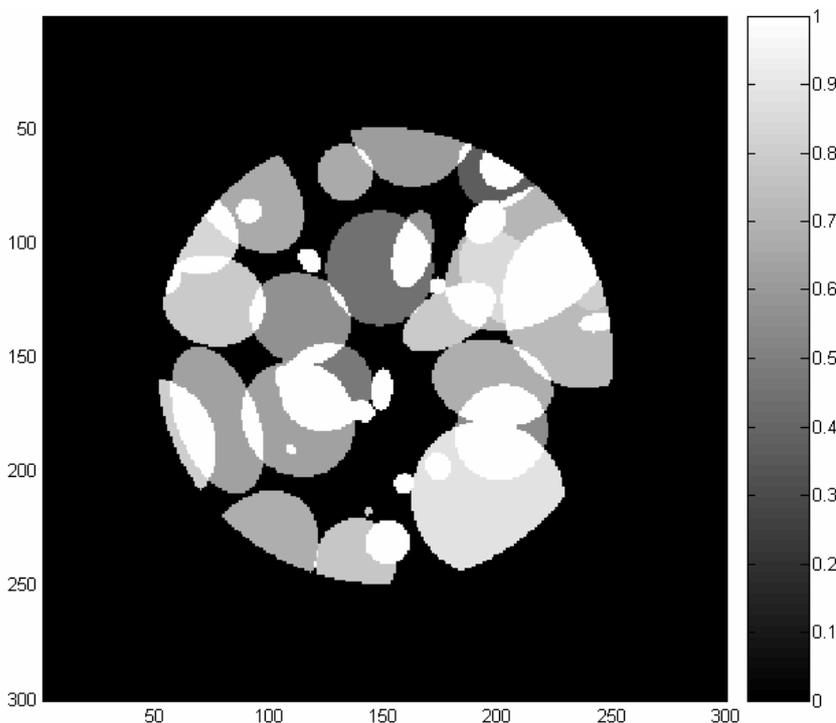


Figura 18. Ejemplos de fotografía hemisféricas

De acuerdo con diversos autores, las fotografías hemisféricas están afectadas por una serie de factores como son: la lente empleada, los ajustes de exposición y apertura, la correcta nivelación de la cámara, condiciones de iluminación en el momento de la toma de la fotografía, así como errores en el procesamiento de las imágenes (Danson et al., 2007; Solberg et al., 2009; Zhang et al., 2005). De cara a evitar los problemas de iluminación, se recomienda tomar estas fotografías al amanecer, al atardecer o bajo cielo nublado (Frazer et al., 1997; Zhang et al., 2005).

A pesar de las limitaciones de las fotografías hemisféricas constituyen la principal fuente de datos empleadas para validar la fracción de cubierta estimada a partir de datos LiDAR, aún cuando las estimaciones hechas a partir de las fotografías hemisféricas pueden ser menos precisas debido a los factores descritos anteriormente. Otro factor que debe tenerse en cuenta a la hora de explicar las diferencias entre las estimaciones hechas a partir de fotografía hemisférica y de datos LiDAR aeroportados, es el distinto punto de vista empleado por uno y otro sistema, ya que observan el dosel desde dos posiciones opuestas.

Holmgren et al., (2008) obtuvieron la fracción de cabida cubierta a partir de las medidas del tamaño de las copas tomadas en campo. Para cada árbol se midió las dimensiones de las copas en dos ejes perpendiculares. Estos semiejes se emplearon para dibujar las elipses correspondientes a cada copa. Uno de los ejes se midió siempre en dirección al centro de la parcela para determinar qué proporción de la copa quedaba dentro y cuál fuera en el caso de los árboles situados en los extremos de la parcela. Posteriormente, se superpusieron las elipses dibujadas para determinar el porcentaje de suelo ocupado por el dosel (figura 19):



**Figura 19: Fracción de cabida cubierta estimada a partir de los datos de campo (tomado de Holmgren et al., 2008)**

El mismo procedimiento fue empleado para estimar la fracción de cabida cubierta correspondiente a matorral.

### 3.3. Determinación del tamaño de la muestra

Un aspecto de gran importancia a la hora de realizar el trabajo de campo es la determinación del tamaño de la muestra debido al alto coste que tiene la realización de estas medidas. Por otro lado, el número de muestras debe ser lo suficientemente grande como para que los resultados obtenidos sean significativos estadísticamente. Existen fórmulas que permiten determinar el tamaño de la muestra para una precisión deseada en función del error de muestreo relativo. Debe tenerse en cuenta que el tamaño de la muestra está en función de la variabilidad del bosque y de la precisión requerida, no de la superficie del bosque a inventariar. Además, normalmente no se conoce de antemano el coeficiente de variación, por lo que suele tomarse un valor de bosques cercanos o bien se realiza un muestro piloto, aunque este último método es poco práctico.

Debido a las dificultades mencionadas para determinar el tamaño de la muestra, el número de parcelas empleadas para calibrar y validar los productos generados a partir de datos LiDAR varía enormemente, estando el número normalmente limitado por cuestiones prácticas. La siguiente tabla muestra algunos ejemplos encontrados en la literatura:

Tabla 5: Tamaños de muestras empleadas en distintos estudios

Autor	Año	Superficie área de estudio (ha)	Número de parcelas
Andersen et al.	2006	2 áreas de 3 ha y 4 ha respectivamente	37 árboles zona 1 34 árboles zona 2
Gaveau y Hill	2003	4 zonas (2 de matorral y 2 de arbolado)	43 muestras sobre matorral 39 muestras sobre arbolado
Naesset	1997	36 rodales repartidos en 2 zonas de estudio	14 – 15 parcelas por rodal
Hollaus et al.,	2006	6490 ha	103
Wan y Glenn	2008	100 ha	79
Zimble et al.	2003	4046,86 ha	49
García et al.	2010	382 km <sup>2</sup> (zona total aunque sólo se tomaron 3 líneas de vuelo sin solape)	46
Holmgren et al.	2008	100 ha	30
(Zhao et al.)	2008	4800	62
Morsdorf et al.,	2006		83 fotografías hemisféricas
(Naesset)	2004	6500 ha	116
Maltamo et al.,	2005	50 ha	28

## 4 REFERENCIAS

- Andersen, H.-E., McGaughey, R.J., & Reutebuch, S.E. (2005). Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 94, 441-449
- Andersen, H.E., Reutebuch, S.E., & McGaughey, R.J. (2006). A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32, 355-366
- Baltsavias, E.P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 199-214
- Brokaw, N.V.L., & Lent, R.A. (Eds.) (1999). Vertical structure: Hunter, M.L. (Ed.), *Maintaining biodiversity in forest ecosystems* (pp.373-399). Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Coren, F., & Sterzai, P. (2006). Radiometric correction in laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3097-3104
- Danson, F.M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B., & Allgöwer, B. (2007). Forest Canopy Gap Fraction From Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4, 157-160
- Dubayah, R., & Drake, J.B. (2000). Lidar Remote Sensing for Forestry Applications. *Journal of Forestry*, Volume 98, Number 6, 1 June 2000, pp. 44-46
- Frazer, G., Trofymow, J., & Lertzman, K. (1997). A method for estimating canopy openness, effective leaf area index and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques. In. Tech. rep., Information Report BC-X-373, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC
- García, M., Danson, F.M., Riaño, D., Chuvieco, E., Ramirez, F.A., & Bandugula, V. (2011b). Terrestrial laser scanning to estimate plot-level forest canopy fuel properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 636-645
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., & Danson, F.M. (2010). Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in Spain using height and intensity LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 816-830
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, F.J., & Danson, F.M. (2011). Multispectral and LiDAR data fusion for fuel type mapping using Support Vector Machine and decision rules. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1369–1379
- Gaveau, D.L.A., & Hill, R.A. (2003). Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*, 29, 650-657
- Harding, D.J., Lefsky, M.A., Parker, G.G., & Blair, J.B. (2001). Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 76, 283-297
- Höfle, B., & Pfeifer, N. (2007). Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, 415-433

- Holmgren, J., Johansson, F., Olofsson, K., Olsson, H., & Glimskär, A. (2008). Estimation of crown coverage using airborne laser scanning. In Hill, R., Rosette, J. & Suárez, J. (Eds.) 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. SilviLaser. Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, pp. 50-57
- Hollaus, M., Wagner, W., Eberhöfer, C., & Karel, W. (2006). Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60, 323-338
- Hopkinson, C., & Chasmer, L. (2009). Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. *Remote Sensing of Environment*, 113, 275-288
- Huisig, E.J., & Gomes Pereira, L.M. (1998). Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, 241-261
- Hyypä, I., Hyypä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Ronnholm, P., Pyysalo, U., Pitkanen, J., & Maltamo, M. (2004). Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. In M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, & H. Weinacker (Eds.), *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and the Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI-w2.
- Hyypä, J., & Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 16, 27-42
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehikoinen, 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 on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 969 - 975
- Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., R., Q., Armstrong, L., & R., S. (2003). Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 633-649
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Acker, S.A., Parker, G.G., Spies, T.A., & Harding, D. (1999). Lidar Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests. *Remote Sensing of Environment*, 70, 339-361
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27, 88-106
- Lin, Y., Jaakkola, A., Hyypä, J., & Kaartinen, H. (2010). From TLS to VLS: Biomass Estimation at Individual Tree Level. *Remote Sensing*, 2, 1864-1879;doi:1810.3390/rs2081864
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Culvenor, D.S., & Coops, N.C. (2003). Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 607-622
- Maas, H.-G. (2001). On the use of reflectance data for laserscanner strip adjustment. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, 53-56
- Maier, B., Tiede, D., & Dorren, L. (2008). Characterising Mountain Forest Structure using Landscape metrics on LiDAR-based Canopy Surface Models. In T. Blaschke, S. Lang, & G. Hay (Eds.), *Object-Based Image Analysis - Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Berlin: Springer, 625-643

- Maltamo, M., Eerikainen, K., Pitkanen, J., Hyyppa, J., & Vehmas, M. (2004). Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment*, 90, 319-330
- Mallet, C., & Bretar, F. (2009). Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 1-16
- Morsdorf, F., Kotz, B., Meier, E., Itten, K.I., & Allgower, B. (2006). Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104, 50-61
- Næsset, E. (1997). Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52, 49-56
- Naesset, E. (2004). Practical Large-scale Forest Stand Inventory Using a Small-footprint Airborne Scanning Laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, 167-179
- Naesset, E., & Bjercknes, K.-O. (2001). Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 78, 328-340
- Nelson, R., Krabill, W., & MacLean, G. (1984). Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 15, 201-212
- Nelson, R., Valenti, M.A., Short, A., & Keller, C. (2003). A multiple resource inventory of Delaware using airborne laser data. *Bioscience*, 35, 981-992
- Packalén, P., Pitkänen, J., & Maltamo, M. (2008). Comparison of individual tree detection and canopy height distribution approaches: a case study in Finland. In R. Hill, J. Rosette, & J. Suárez (Eds.), 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. *SilviLaser*. Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, pp. 22-29
- Page, L.M., & Cameron, A.D. (2006). Regeneration dynamics of Sitka spruce in artificially created forest gap. *Forest Ecology and Management*, 221, 260-266
- Pascual, C., García-Abril, A., Cohen, W.B., & Martín-Fernández, S. (2010). Relationship between LiDAR-derived forest canopy height and Landsat images. *International Journal of Remote Sensing*, 31, 1261-1280
- Persson, A., Holmgren, J., & Soderman, U. (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 925-932
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., & Nelson, R.F. (2002). Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, 71-95
- Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., Andersen, H.-E., & Carson, W.W. (2003). Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 527-535
- Riaño, D., Valladares, F., Condes, 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
- Ritchie, J.C., Evans, D.L., Jacobs, D., Everitt, J.H., & Weltz, M.A. (1993). Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 36, 1235-1238

- Solberg, S., Brunner, A., Hanssen, K.H., Lange, H., Naesset, E., Rautiainen, M., & Stenberg, P. (2009). Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*
- Vain, A., Yu, X., Kaasalainen, S., & Hyyppä, J. (2010). Correcting Airborne Laser Scanning Intensity Data for Automatic Gain Control Effect. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 7, 511-514. doi:510.1109/LGRS.2010.2040578
- Wang, C., & Glenn, N.F. (2008). A linear regression method for tree canopy height estimation using airborne lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34, S217-S227
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68-82
- Wing, M., Solmie, D., & Kellogg, L. (2004). Comparing digital range finders for forestry applications. *Journal of Forestry*, 102, 16-20
- Yu, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., & Maltamo, M. (2004). Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90, 451-462
- Zhang, Y., Chen, J., & Miller, J. (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, 166-181
- Zhao, K., Popescu, S., & Nelson, R. (2008). Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. *Remote Sensing of Environment*, 113, 182-196
- Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., & Gerard, P.D. (2003). Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87, 171-182