

APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LÍDAR AL ESTUDIO DE LA CUBIERTA VEGETAL

RUIZ, A. ⁽¹⁾; COROMINES, M.; BLANCO, E. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut Cartogràfic de Catalunya, Parc de Montjuïc, 08030 BARCELONA; toni@icc.es

⁽²⁾ Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Pujada del Seminari s/n, 25280 SOLSONA; marc.coromines@ctfc.es; ester.blanco@ctfc.es

MESA TEMÀTICA 5. “Inventario y ordenación de sistemas y recursos forestales”

Resumen

En este trabajo se ha estudiado la aplicación del sensor lidar aerotransportado para el cálculo de parámetros forestales. El marco de estudio se ha centrado sobre las cuencas de los ríos Ter y Foix. Los parámetros que se han obtenido a partir de los datos lidar han sido la altura, el diámetro de copa y el índice de penetración los cuales han sido comparados con los parámetros equivalentes medidos en campo: altura, diámetro de copa y fracción cabida de cubierta (fcc).

PALABRAS CLAVE: sensor aerotransportado, inventario forestal, dendrometría

INTRODUCCIÓN

La técnica lidar permite la medida automatizada de parámetros como la altura de la vegetación, la identificación de pies, el tamaño de copa y la fracción de cabida de cubierta de forma exhaustiva y económica en toda una región de estudio, a diferencia de las técnicas habituales de muestreo en campo.

Como su nombre indica, *Light Detection And Ranging*, se basa en la medición de distancias a partir de láser. Emite un pulso que, tras rebotar en el terreno, regresa al detector y mide la distancia recorrida a partir del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la señal. Un sistema de barrido desvía el rayo láser perpendicularmente a la trayectoria del avión o helicóptero y barre el terreno bajo él. El equipo incorpora un sistema de posicionamiento GPS y un sistema inercial de navegación que permiten calcular las coordenadas de los puntos medidos mediante orientación directa. Es preciso otro equipo GPS en tierra para hacer GPS diferencial (DGPS) y así obtener una trayectoria con una precisión mejor de 10 cm.

Los datos empleados han sido capturados con un Optech ALTM 3025 propiedad del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). En este instrumento, el sistema de barrido es un espejo oscilante galvanométrico. Las características principales del equipo son las siguientes:

Frecuencia del pulso láser: 25 kHz

Ángulo de barrido ajustable: 0° - ±20°

Frecuencia de barrido ajustable

Divergencia del haz: 0.2-0.67 mrad

Altitud de vuelo (H): 175-3000 m

Medida de primer y último eco

Medida de la intensidad reflejada

Longitud de onda: 1064 nm (infrarrojo)

Compensación del alabeo

En las aplicaciones más habituales, el ángulo y la frecuencia de barrido se ajustan junto con la altitud y la velocidad de vuelo para obtener sobre el terreno una distribución de puntos lo más homogénea posible.

El lidar proporciona las coordenadas tridimensionales y la intensidad reflejada por cualquier objeto que se interponga en su camino y que refleje una cantidad de energía suficiente para ser detectado. Las precisiones (1 sigma) que se obtienen en las coordenadas de los puntos láser para las configuraciones que se emplean habitualmente son de unos 10 cm en dirección vertical y de unos 45 cm en horizontal. (RUIZ, 2005).

Para cada pulso que se emite se miden 2 ecos, el primero y el último eco recibidos, que pueden ser coincidentes o corresponder a objetos diferentes. Barriendo con lidar un área cubierta de vegetación, se obtienen puntos a cualquier altura sobre la cubierta vegetal, rebotados por las ramas, hojas y troncos y en que algunos de ellos alcanzan también el suelo. Mediante técnicas de clasificación, de la nube de puntos irregulares se pueden extraer aquellos que corresponden a rebotes sobre el terreno y construir un modelo digital de elevaciones o DTM. Los puntos más altos medidos corresponden a una superficie que pasa por encima de la vegetación y edificios y se suele denominar modelo digital de superficie o DSM. La diferencia entre el DSM y el DTM proporciona el modelo de superficie normalizado o modelo de altura de la vegetación.

OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo ha sido mejorar el conocimiento en la utilización del lidar para aplicaciones forestales, procesando las nubes de puntos lidar para obtener variables descriptivas de los árboles individuales.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS OBTENIDOS

Para el estudio no se han realizado vuelos *ex-profeso*, sino que se han aprovechado los datos obtenidos de anteriores vuelos. Éstos corresponden a un estudio del riesgo de inundaciones de Cataluña y son datos, por tanto, de cuencas inundables. Los tipos de vegetación analizados corresponden a vegetación de ribera y pinar.

Los datos de la cuenca del Ter se capturaron el 25 de marzo de 2002 y los del Foix los días 10 y 13 de abril de 2003. Los parámetros de configuración del sistema lidar y de vuelo se indican en la "Tabla 1".

Todos los vuelos se realizaron a 2300 m sobre el terreno. A esta altitud, el diámetro de la huella láser sobre el terreno es de 46 cm. Como se ha volado con un solapamiento del 50% entre pasadas, las densidades obtenidas son de 2 puntos/m² para la cuenca del río Ter y de 1 punto/m² para la del Foix.

Se ha aplicado la metodología de corrección de errores sistemáticos descrita en (KORNUS & RUIZ, 2003). La precisión de los modelos del terreno resultantes se comprobó con puntos medidos en campo con GPS/RTK con una precisión de unos 3 cm para diferentes áreas planas con cobertura vegetal diversa. En cada área se midieron al menos 10 puntos. Los valores para la cuenca del Ter se muestran en la "Tabla 2". La columna "Altura aprox." indica la altura aproximada de la vegetación, "N" el número de puntos medidos en campo y las columnas siguientes muestran la media y la desviación estándar de las diferencias entre la cota interpolada en el modelo y la cota medida en el campo. Hay subtotales para la zona oeste y para la zona sur porque se volaron en épocas distintas. La zona oeste se voló en marzo de 2002 mientras que los campos de control de la zona sur se volaron el 18 julio de 2002. La "Tabla 3" muestra los valores obtenidos en la cuenca del Foix.

Las precisiones obtenidas son aproximadamente de 10 cm en altimetría (1 sigma) con errores sistemáticos de unos 5 cm. La mayor precisión de los resultados de los vuelos realizados en invierno y principios de primavera se explica por la menor densidad de la cubierta vegetal que permite que un mayor número de puntos láser alcance el suelo.

Para la clasificación de los puntos se ha aplicado la metodología descrita en (RUIZ Y KORNUS, 2003). Se clasificaron primero los puntos correspondientes al terreno mediante un procedimiento automático y posteriormente se realizó una edición manual de los resultados, todo ello utilizando un programa comercial. Con estos puntos se construyó un modelo del terreno de malla irregular de triángulos (TIN). Los puntos situados a menos de 20 cm de esta superficie se consideraron puntos del terreno y los situados a mayor distancia se consideraron como pertenecientes a la vegetación.

En campo se midió la altura total del árbol, la altura del árbol en la base de la copa y el diámetro de la copa, parámetros adecuados para calcular posteriormente valores de volumen y calidad de la madera siguiendo modelos matemáticos (RODRÍGUEZ Y BROTO, 2003).

Estudio 1. Identificación de los árboles individuales

Se han tratado dos parcelas de muestra con una misma metodología y los resultados se han comparado con los obtenidos por interpretación del ortofotomapa escala 1:5000 color del ICC, con píxel de 0.5 m. Se ha comparado el número de árboles y su posición relativa identificados automáticamente a partir de los datos lidar y estos mismos valores obtenidos por fotointerpretación "Figura 1". Como la toma de datos lidar y del ortofotomapa no fueron simultáneas y como la resolución del ortofotomapa es pequeña, los únicos datos que se han comprobado han sido la densidad y la posición relativa de los pies.

Parcela A, Quart (Gironès): Coordenadas (UTM-31): 486855, 4645645. Se trata de un cultivo de *Platanus x hispanica*, con una distribución de los árboles organizada en líneas paralelas. A pesar de no corresponder a una casuística propia de las masas forestales mediterráneas, se ha utilizado como caso más sencillo posible, por la homogeneidad de los individuos presentes, la distribución regular de los pies y la morfología suave del terreno.

Parcela B, Pals (Baix Empordà): Coordenadas 516603, 4647890. Es un área de *Pinus pinea*. Carece de sotobosque. Árboles de copa desplegada y de altura considerable. La identificación de los individuos a partir del ortofotomapa es más sencilla que en el caso anterior.

Para identificar los árboles individuales a partir de los datos lidar se ha realizado un estudio morfológico del modelo de altura de la vegetación en el cual se han detectado cada una de las copas. Los resultados dependen, en principio, de la parcela estudiada y de la densidad de puntos lidar. Como las densidades con las que hemos trabajado son algo bajas, sólo se ha realizado este análisis en parcelas sencillas con árboles fácilmente identificables. El procedimiento que se ha seguido ha sido el siguiente: 1) Determinación del modelo de altura de la vegetación mediante la substracción del DSM) y el DTM. 2) Determinación de la dirección de flujo hidráulico en un modelo de altura de la vegetación invertido 3) Cálculo de la superficie de influencia de cada árbol mediante el estudio de las cuencas obtenidas con el cálculo anterior y 4) Filtrado de resultados según la morfología típica de las estructuras forestales.

La aplicación de los cálculos anteriores, supone la sobreestimación de la superficie correspondiente a cada árbol, sobre todo en paisajes forestales donde haya árboles aislados o una fracción de la superficie forestal no recubierta por demasiados árboles, debido básicamente a que las zonas descubiertas, con valores de altura más pequeños, presentan una dirección del flujo que converge en las zonas arbóreas, con alturas más elevadas. Para evitar dicho defecto se ha impuesto que cada copa terminase al alcanzar 1/3 de la altura mediana de

los árboles presentes en la parcela de estudio. Como posición de los árboles aislados se ha tomado la del centroide de su cuenca obtenida con el método anterior.

Estudio 2. Medición de variables individuales

Para la medición de variables individuales se seleccionaron tres parcelas situadas a lo largo de la cuenca del río Foix. De los 33 árboles analizados en total “Tabla 4” se tomaron los siguientes datos: especie; altura total del árbol, medida con un hipsómetro láser modelo Vertex II; diámetro de la copa, medida con cinta métrica según dos ejes perpendiculares; altura de la base de la copa, medida mediante un hipsómetro láser; diámetro normal del árbol (DBH) a 1.30 m de altura, con forcípula; fcc, 4 valores medidos bajo la copa del árbol y posición del pie del árbol medido con GPS. La fcc se obtuvo mediante 4 medidas distribuidas a lo largo de 2 ejes perpendiculares correspondientes a los diámetros máximos y mínimos de la copa. En general, se eligió un punto de muestreo situado entre el pie del árbol y los extremos de la copa pero no se tuvieron en cuenta las condiciones de luz ni la posición del Sol en el momento de realizar las medidas.

Únicamente se han analizado la altura total, el diámetro de la copa y la fcc. Estas tres variables se compararon con los parámetros supuestamente equivalentes derivados a partir de lidar: Altura máxima de la vegetación observada en el área de influencia del individuo; diámetro máximo y mínimo de la copa calculada de forma automática; índice de penetración del lidar, definido como el porcentaje de puntos que alcanzaron el terreno sobre el número total de puntos y centroide de la copa calculada de forma automática.

El ALTM 3025 proporciona para cada pulso emitido dos medidas de la distancia correspondientes al primer y al último eco. Hay al menos 3 posibilidades para definir el índice de penetración del lidar: 1) utilizando sólo los datos de primer eco, 2) utilizando sólo los de último eco y 3) utilizando ambos ecos simultáneamente. La opción 1 se ha mostrado inadecuada porque la mayor parte de los primeros ecos se producen en contacto con las partes más elevadas de la vegetación y el número de puntos de primer eco que alcanzan el suelo es pequeño. Se presentan sólo los resultados de las opciones 2 y 3 “Figuras 2 y 3”

Comparación lidar – ortofotomapa

En ambos casos se produce una sobreestimación del número de pies mediante lidar respecto a los identificados en el ortofotomapa “Tabla 5” pero esta última interpretación tampoco es perfecta. En algunos casos se produce error por subestimación porque resulta difícil definir los límites concretos de un individuo. En la Parcela A se ha comparado la ubicación de los pies calculados a partir del centroide con las ubicaciones determinadas por fotointerpretación; 224 pies están situados a menos de 1m de distancia del que se considera el punto central del árbol a partir de la ortofoto y 272 a menos de 2m. Estos resultados muestran la coherencia entre ambas técnicas.

Medición de variables individuales

En las “Tablas 6 y 7” se resumen los valores de altura y los diámetros medios de copa para cada individuo en las tres parcelas. El diámetro medio se ha calculado como la media de los valores en dos semiejes ortogonales (en campo y mediante lidar). De la misma forma, en la “Tabla 8” se exponen las regresiones obtenidas para la altura y el diámetro.

Los valores medios de fcc y de índice de penetración (IP) calculados a partir de puntos del último eco (IP2) y calculados con puntos del primer y último eco (IP3) se muestran en la “Tabla 9”. Así mismo, los gráficos correspondientes a los coeficiente de penetración se muestran en las “Figuras 4 y 5”. Las regresiones para fcc y el índice de penetración IP2 se muestran en la “Tabla 10”.

CONCLUSIONES

- Se observa que las alturas máximas de la vegetación medidas con lidar suelen ser inferiores a las alturas reales. Interpretamos que esto es debido a la baja probabilidad de que un punto lidar coincida con el punto más alto de la copa del árbol. Esto puede suponer un sesgo en el estudio y debe tenerse en cuenta a través de una estimación de la diferencia típica observada. En este estudio, esta diferencia se ha situado en alrededor de un metro y suponemos que dependerá de la densidad de puntos lidar, de la especie vegetal y de su estado de crecimiento.

- Los diámetros de copa observados mediante lidar presentan una problemática más compleja: en los casos en que las copas se presenten compactas o en aquellos donde hay una ramificación muy desarrollada pueden aparecer falsas copas que en realidad pertenecen a un mismo árbol.

- El resultado es una sobreestimación del número de pies y una reducción del diámetro medio de algunos árboles, así como la aparición de formas de copa extrañas.

- La fcc puede llegar a estimarse a través del índice de penetración lidar tanto si se calcula a partir de los puntos del último eco como si se realiza con los del primer y último eco.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente a través del programa ACES del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya.

BIBLIOGRAFÍA

- KORNUS, W.; RUIZ, A., 2003 "Strip Adjustment of LIDAR Data". WG III/3 workshop on airborne laserscanning, "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data", 8.10.03 - 10.10.03, Dresden.

- RODRÍGUEZ, F.; BROTO, 2003. Cubica v1.2. Programa informático para cubicar y clasificar productos a partir de los datos procedentes de un inventario. *Revista Montes*, 2º Trimestre 2003, N.º 72.

RUIZ, A.; KORNUS, W., 2003. Experiencias y aplicaciones del LIDAR. V Semana Geomática, 11.2.03 -14.2.03, Barcelona.

RUIZ, A., 2005. "Horizontal accuracy of lidar data". ICC. Inédito

FIGURAS Y TABLAS

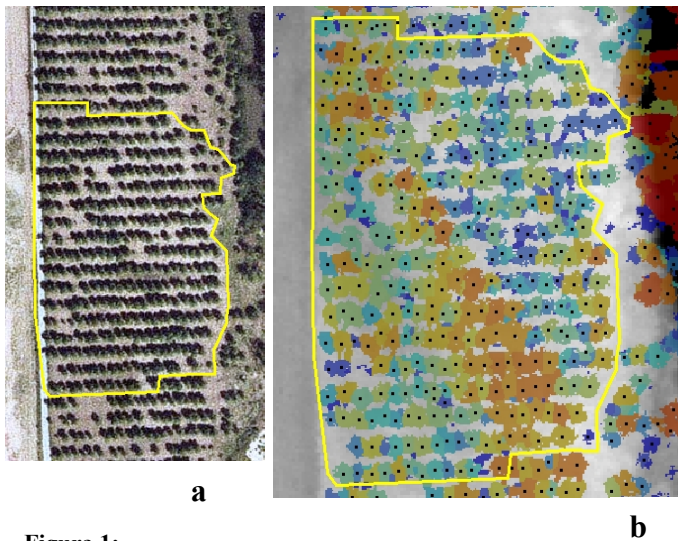


Figura 1:
 a) Ortofotomapa correspondiente a la zona de estudio
 b) Árboles identificados mediante la metodología propuesta

Altura de los árboles

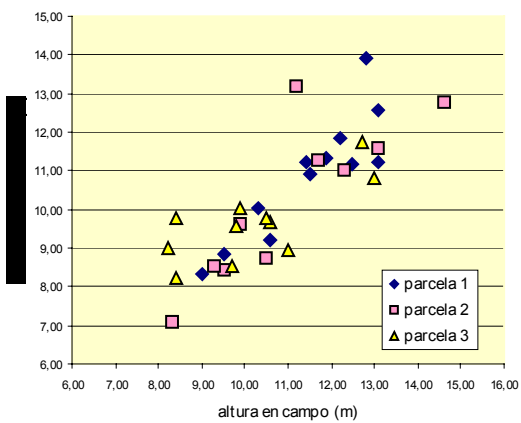


Fig. 2: Relación entre la altura total medida en campo con la altura a partir de datos lidar (m)

Diámetro de copas

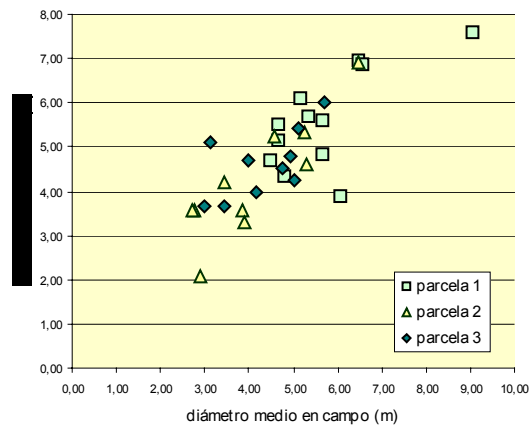


Fig. 3: Relación entre el diámetro medio medido en campo con el diámetro medio a partir de datos lidar (m)

Coefficiente penetración (opción 2)

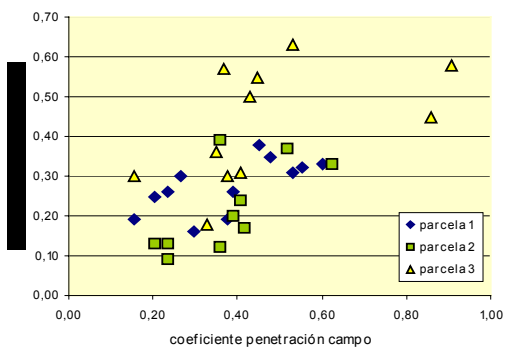


Figura 4: Relación entre el coeficiente de penetración medido en campo respecto la medición con datos lidar (opción 2)

Coefficiente de penetración (opción 3)

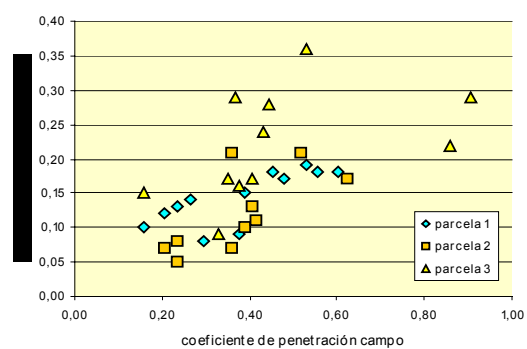


Figura 5: Relación entre el coeficiente de penetración medido en campo respecto la medición con datos lidar (opción 3)

Tabla 1. Parámetros de vuelo

| Parámetros de vuelo | Ter | Foix |
|--------------------------------|--------|--------|
| Velocidad (m/s) | 61.7 | 61.7 |
| Semiángulo de barrido (grados) | 5 | 10 |
| Frecuencia de barrido (Hz) | 42 | 22 |
| Frecuencia del pulso (Hz) | 25,000 | 25,000 |
| Altitud sobre el terreno(m) | 2300 | 2300 |
| Solapamiento entre pasadas (%) | 50 | 50 |
| Divergencia del rayo (mrad) | 0.2 | 0.2 |
| Anchura de la pasada (m) | 402 | 811 |

Tabla 2. Comprobación de los resultados en la cuenca del Ter

| Área | Vegetación | Altura aprox. (m) | N | Media residuos (m) | Sigma (m) |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------|--------------------|-------------|
| 1 | Terreno desnudo | 0 | 12 | -0.05 | 0.03 |
| 2 | Matorral | 1.1 | 20 | 0.00 | 0.06 |
| 3 | Matorral | 1.3 | 10 | 0.05 | 0.05 |
| 5 | Avellanos | 5.15 | 20 | 0.01 | 0.04 |
| 6 | Cereal | - | 12 | 0.02 | 0.04 |
| 7 | Chopos | 14.3 | 12 | 0.07 | 0.07 |
| 9 | Asfalto | 0 | 10 | -0.04 | 0.03 |
| Total Oeste | | | 96 | 0.01 | 0.06 |
| 11 | Pinos y encinas | 10.30 | 20 | 0.00 | 0.08 |
| 12 | Plátanos | 8.5 | 12 | 0.14 | 0.36 |
| 13 | Campo yermo | 0 | 12 | 0.01 | 0.05 |
| 15 | Chopos | 8 | 12 | 0.10 | 0.10 |
| 16 | Cereal | - | 12 | 0.06 | 0.05 |
| 17 | Asfalto | 0 | 10 | 0.07 | 0.05 |
| Total Sur | | | 88 | 0.08 | 0.14 |
| Total | | | 174 | 0.04 | 0.11 |

Tabla 3. Comprobación de resultados en la cuenca del Foix

| Área | Vegetación | Altura aprox. (m) | N | Media residuos (m) | Sigma (m) |
|-------|----------------|-------------------|-----|--------------------|-----------|
| 11 | Viña | 1.1 | 21 | -0.1 | 0.03 |
| 12 | Avellanos | 3.5 | 20 | -0.09 | 0.04 |
| 22 | Jardín acacias | 3.5 | 11 | -0.02 | 0.06 |
| 41 | Matorral | 1.5 | 21 | -0.06 | 0.07 |
| 42 | Hierba | 0.05 | 21 | -0.04 | 0.05 |
| 50 | Carretera | 0 | 15 | -0.02 | 0.13 |
| 51 | Viña | 0.8 | 20 | -0.06 | 0.06 |
| 52 | Pinos | 18 | 29 | -0.04 | 0.07 |
| Total | | | 158 | -0.06 | 0.06 |

Tabla 4. Localización de las parcelas y del número de árboles analizados

| Parcela | X UTM (centro) | Y UTM (centro) | Nº árboles |
|---------|----------------|----------------|------------|
| 1 | 386286 | 4568226 | 12 |
| 2 | 385167 | 4570077 | 10 |
| 3 | 383922 | 4571613 | 11 |
| TOTAL: | | | 33 |

Tabla 5. Árboles detectados con lidar y sobre ortofotomapa

| | Ortofoto | Lidar |
|--|----------|--------|
| Parcela A: Plátanos | | |
| Número de pies aislados | 306 | 337 |
| % de pies detectados | 100 | 110.13 |
| Parcela B: Pinar de <i>Pinus pinea</i> | | |
| Número de pies aislados | 86 | 107 |
| % de pies detectados | 100 | 124.24 |

Tabla 6. Alturas totales medidas en campo y con lidar (m)

| Árbol | Parcela 1 | | Parcela 2 | | Parcela 3 | |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Lidar | Campo | Lidar | Campo | Lidar | Campo |
| 1 | 8,83 | 9,5 | 11 | 12,3 | 8,4 | 8,24 |
| 2 | 10,02 | 10,3 | 8,75 | 10,5 | 11 | 8,95 |
| 3 | 11,33 | 11,9 | 11,3 | 11,7 | 13 | 10,81 |
| 4 | 11,82 | 12,2 | 8,43 | 9,5 | 8,2 | 9 |
| 5 | 11,22 | 13,1 | 8,55 | 9,3 | 8,4 | 9,77 |
| 6 | 12,55 | 13,1 | 9,6 | 9,9 | 9,8 | 9,57 |
| 7 | 11,15 | 12,5 | 7,1 | 8,3 | 9,9 | 10,04 |
| 8 | 13,9 | 12,8 | 13,2 | 11,2 | 10,6 | 9,66 |
| 9 | 8,35 | 9 | 11,6 | 13,1 | 9,7 | 8,51 |
| 10 | 9,2 | 10,6 | 12,8 | 14,6 | 12,7 | 11,76 |
| 11 | 10,89 | 11,5 | | | 10,5 | 9,76 |
| 12 | 11,22 | 11,4 | | | | |

Tabla 7. Diámetros medios de copa medidos en campo y con lidar (m)

| Árbol | Parcela 1 | | Parcela 2 | | Parcela 3 | |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Campo | Lidar | Campo | Lidar | Campo | Lidar |
| 1 | 6,45 | 6,95 | 6,45 | 6,9 | 4,15 | 3,985 |
| 2 | 5,65 | 4,85 | 5,25 | 5,35 | 5,7 | 6,01 |
| 3 | 4,5 | 4,7 | 3,45 | 4,2 | 5,1 | 5,435 |
| 4 | 4,8 | 4,35 | 2,75 | 3,55 | 3 | 3,65 |
| 5 | 4,675 | 5,5 | 3,85 | 3,575 | 3,1 | 5,125 |
| 6 | 6,55 | 6,85 | 3,9 | 3,3 | 4,75 | 4,51 |
| 7 | 9,05 | 7,6 | 2,875 | 2,1 | 4 | 4,68 |
| 8 | 5,15 | 6,1 | 2,7 | 3,575 | 4,95 | 4,805 |
| 9 | 5,35 | 5,7 | 5,3 | 4,6 | 3,45 | 3,65 |
| 10 | 6,05 | 3,9 | 4,55 | 5,25 | 5,025 | 4,255 |
| 11 | 5,65 | 5,6 | | | | |
| 12 | 4,65 | 5,15 | | | | |

Tabla 8. Regresiones para la altura y el diámetro

| | Altura de los árboles | | Diámetro de copa | |
|-----------|-----------------------|----------------|------------------|----------------|
| | Regresión | R ² | Regresión | R ² |
| Parcela 1 | Y=0.7713x+3.1047 | 0.7793 | Y=0.7811x+1.3331 | 0.478 |
| Parcela 2 | Y=0.7979x+2.8748 | 0.7132 | Y=0.8155x+0.6499 | 0.7575 |
| Parcela 3 | Y=0.4664x+4.8857 | 0.5545 | Y=0.7451x+0.8871 | 0.383 |

Tabla 9. Medias por árbol de fcc (en valores de 1/16) y del índice de penetración lidar (IP) en tanto por 1

| | Parcela 1 | | | Parcela 2 | | | Parcela 3 | | |
|------|-----------|------|-------|-----------|------|-------|-----------|------|-----|
| | FCC | IP2 | IP3 | FCC | IP2 | IP3 | FCC | IP2 | IP3 |
| 8,88 | 0,32 | 0,18 | 10,00 | 0,33 | 0,17 | 6 | 0,57 | 0,29 | |
| 8,50 | 0,31 | 0,19 | 8,25 | 0,37 | 0,21 | 6,5 | 0,31 | 0,17 | |
| 9,63 | 0,33 | 0,18 | 5,75 | 0,39 | 0,21 | 14,5 | 0,58 | 0,29 | |
| 7,63 | 0,35 | 0,17 | 5,75 | 0,12 | 0,07 | 13,75 | 0,45 | 0,22 | |
| 6,25 | 0,26 | 0,15 | 3,75 | 0,13 | 0,08 | 5,25 | 0,18 | 0,09 | |
| 6,00 | 0,19 | 0,09 | 3,25 | 0,13 | 0,07 | 8,5 | 0,63 | 0,36 | |
| 3,75 | 0,26 | 0,13 | 6,25 | 0,20 | 0,10 | 7 | 0,50 | 0,24 | |
| 4,75 | 0,16 | 0,08 | 6,63 | 0,17 | 0,11 | 7 | 0,55 | 0,28 | |
| 2,50 | 0,19 | 0,10 | 3,75 | 0,09 | 0,05 | 2,5 | 0,30 | 0,15 | |
| 7,25 | 0,38 | 0,18 | 6,50 | 0,24 | 0,13 | 6 | 0,36 | 0,17 | |
| 4,25 | 0,30 | 0,14 | | | | 6 | 0,30 | 0,16 | |
| 3,25 | 0,25 | 0,12 | | | | | | | |

Tabla 10. Regresiones para la fcc y IP2

| | Regresión | R ² |
|-----------|------------------|----------------|
| Parcela 1 | Y=47.317x-0.6906 | 0.599 |
| Parcela 2 | Y=13.44x+3.071 | 0.5012 |
| Parcela 3 | Y=12.5x+2.125 | 0.2632 |