

Análisis de la estructura forestal mediante tecnología LiDAR

Prof. Luis Ángel Ruiz Fernández

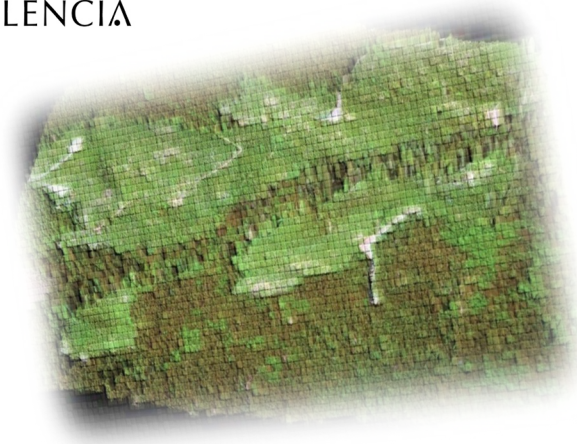
Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección

 CGAT

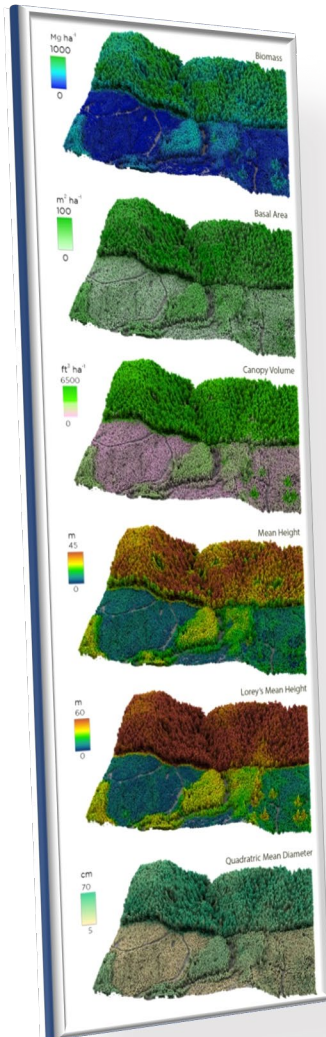
www.cgat.webs.upv.es



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



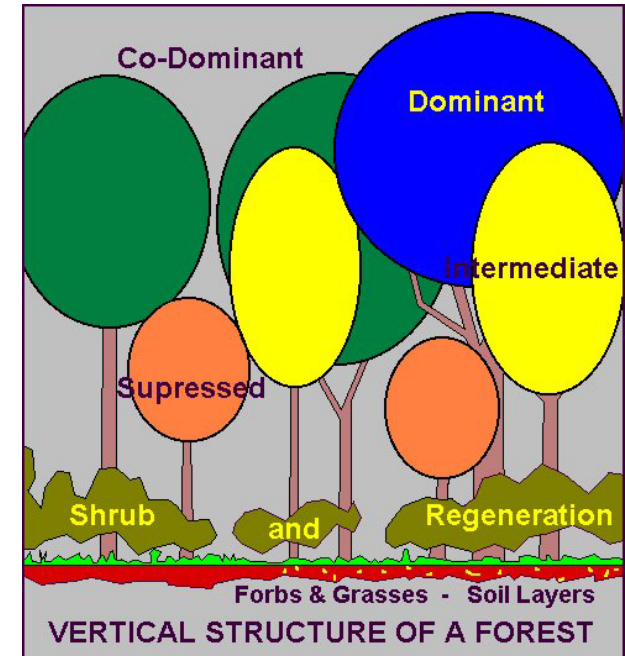
Contenidos



- La estructura forestal
- Datos LiDAR
 - Discreto
 - Full-waveform
- Preprocesado
- Cálculo de métricas LiDAR
- Productos
 - Mapas cuantitativos de variables forestales
 - Mapas cualitativos: Clasificación en tipos de vegetación
- Influencia de parámetros de adquisición
- Conclusiones

Introducción

- » La **estructura** de un bosque hace referencia a la distribución física de los componentes que constituyen un ecosistema forestal.
- » Conocer la estructura forestal es importante para la **gestión forestal sostenible**, y para estimar, por ejemplo:
 - El balance de carbono
 - La productividad de las explotaciones forestales
 - La aptitud para el aprovechamiento energético
 - Variables de inventarios para la gestión forestal
 - Riesgo y propagación de incendios forestales (combustibilidad)



Introducción

- La estructura forestal puede caracterizarse mediante la medición de un conjunto de **variables forestales** (altura de copa, DBH, volumen, biomasa, densidad de plantas,...).



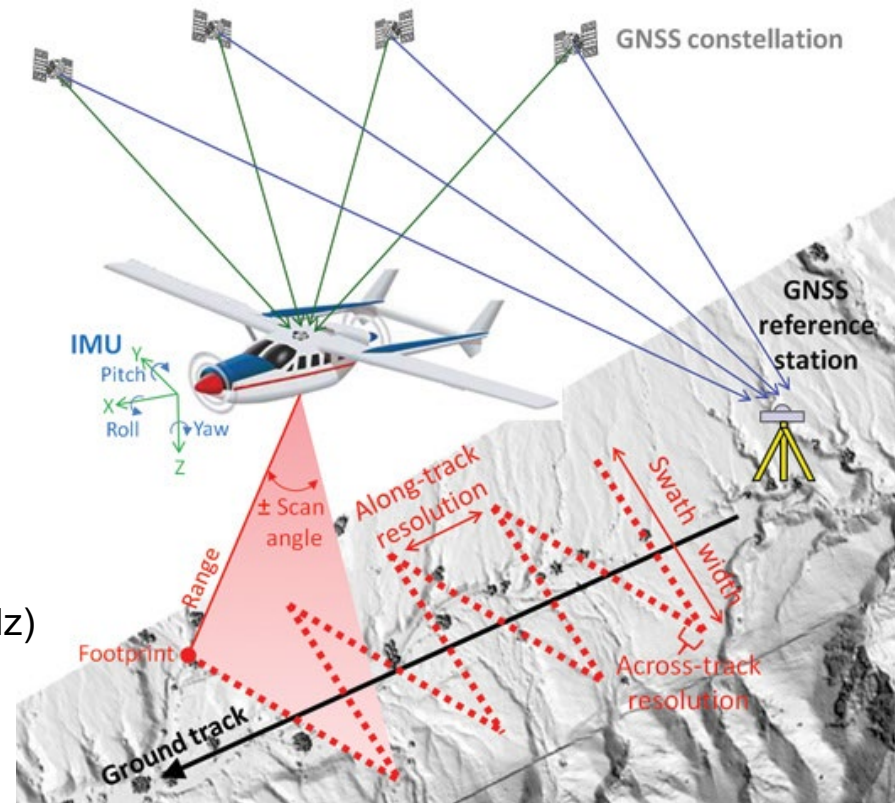
- La **teledetección** permite obtener información de grandes áreas y zonas poco accesibles y realizar estimaciones de variables relacionadas con la estructura forestal. Así, se ha utilizado con éxito una gran diversidad de sensores ópticos (visible, NIR), térmicos y de microondas (radar). En los últimos años se ha desarrollado y aplicado en distintos ámbitos la tecnología LiDAR.

Adquisición datos LiDAR

Un **sistema ALS** (*Airborne Laser Scanner*) consta de los siguientes elementos: unidad de emisión láser; escáner opto-mecánico; unidad de control; unidad de almacenamiento; sistema de posicionamiento global cinemático (GPS) y una unidad de medición inercial (IMU). El GPS y la IMU permiten conocer el punto exacto dónde el pulso láser intercepta un objeto.

El sistema envía un pulso de energía que impacta en el terreno a diferentes alturas, midiendo el tiempo empleado en el retorno al sensor

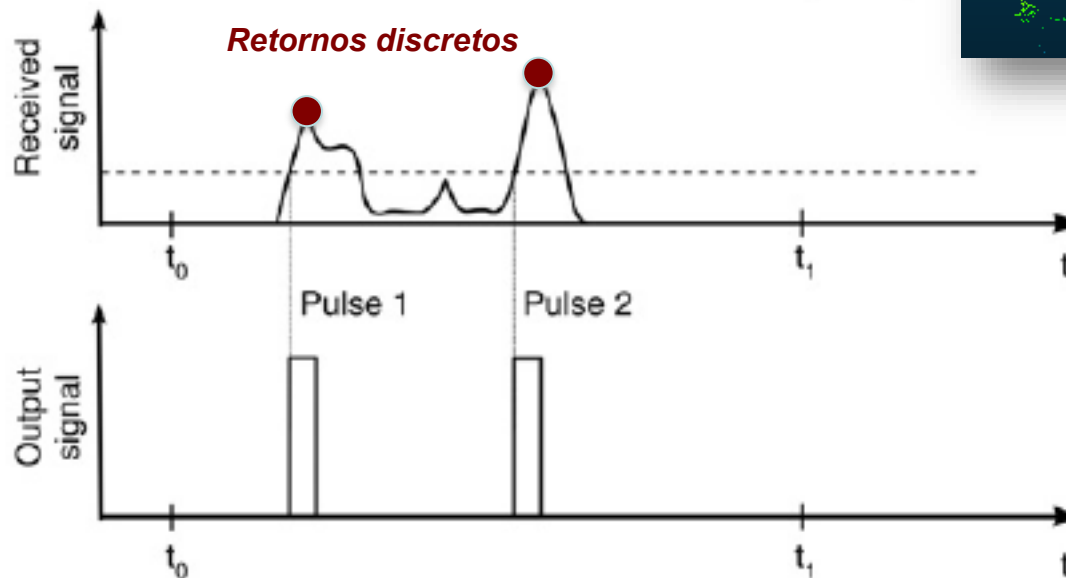
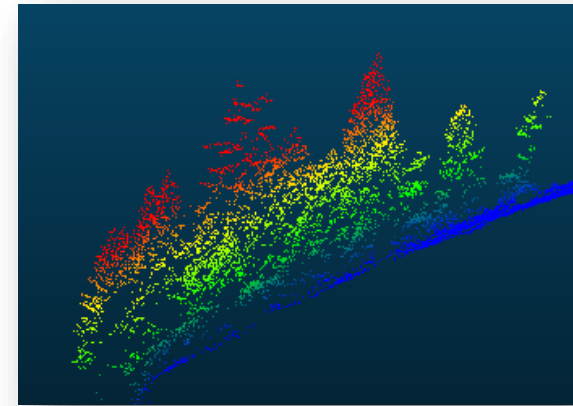
- Duración del pulso (3-10 ns),
- Ancho de barrido (0,15-2 mrad),
- Ángulo de incidencia < 25°
- Longitud de onda (0,8-1,55 μm),
- Frecuencia de repetición del pulso (50-200 kHz)
- En general, para altitudes (500-3000 m) se obtienen 0,5-20 pulsos/m²)



Fuente: Fernández, J.C. *Lifting the Canopy Veil* maging Notes, 26: 2, 2011

LiDAR discreto

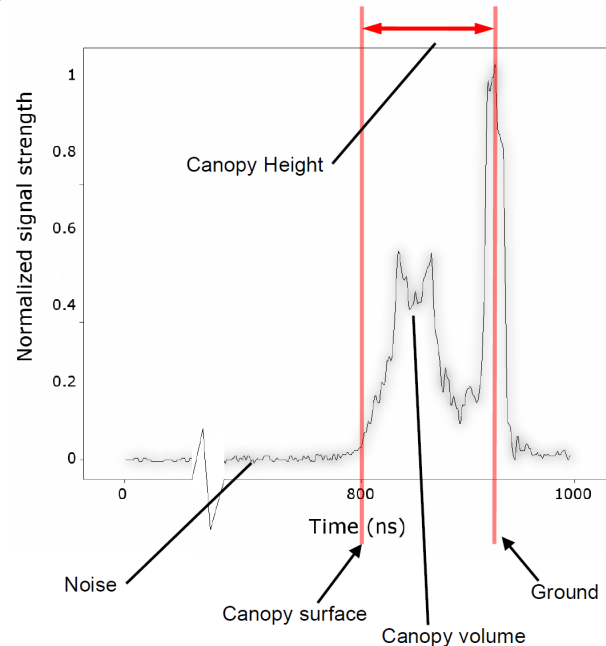
El LiDAR discreto emite un pulso y registra uno o varios retornos de cada pulso, obteniendo un conjunto de coordenadas 3D de la masa forestal a diferentes alturas.



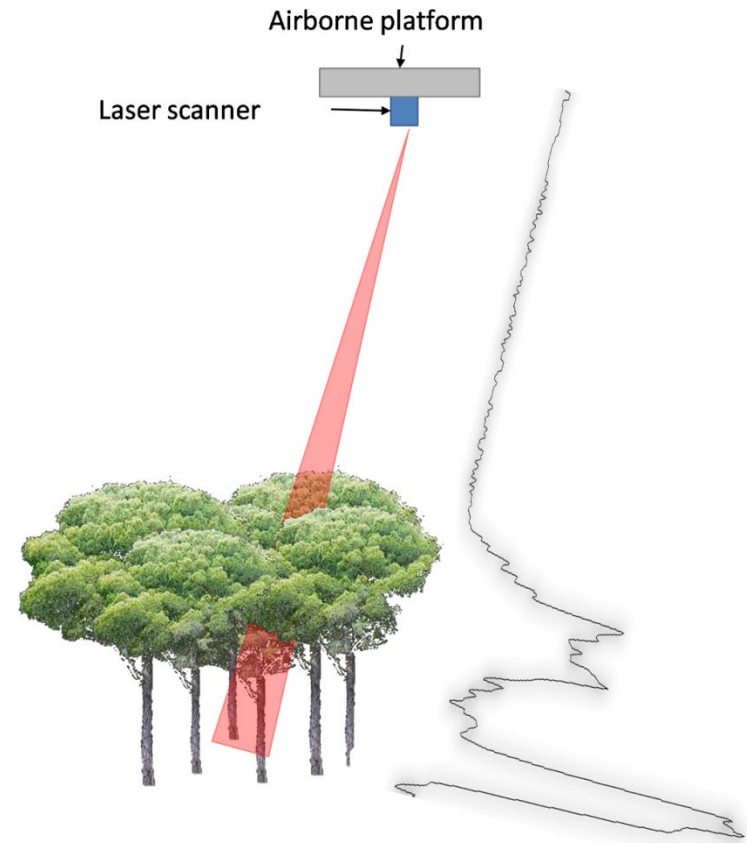
LiDAR full-waveform

Full-Waveform: Se registra el retorno completo del pulso láser emitido (se digitaliza y almacena en 64, 128 ó 256 registros)

Al interaccionar el pulso láser con la vegetación y el terreno, se genera una onda de retorno (*waveform*) única, que se formará por las diferencias en: (1) elevación; (2) % del pulso interceptado en cada nivel de vegetación/suelo; (3) reflectividad de las diferentes superficies de contacto.



Fuente: Pirotti F, 2011. Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods. *iForest* 4: 100-106

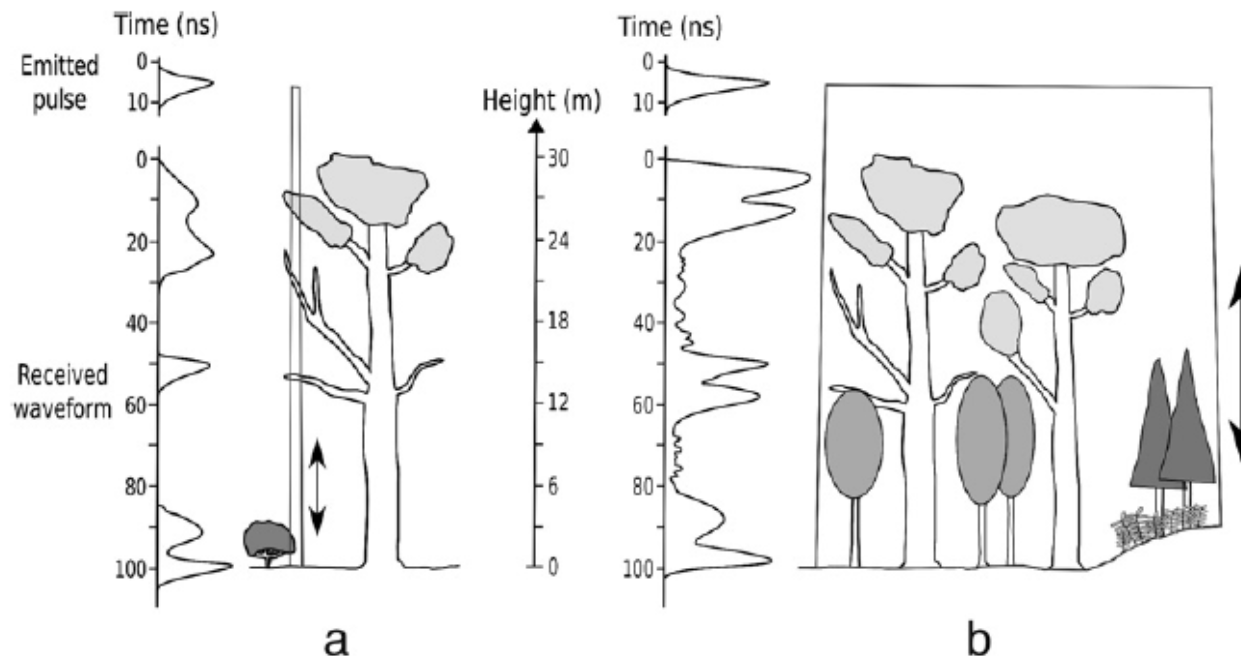


LiDAR full-waveform

Tipos

small-footprint (0.2–3 m)

large-footprint (10–70 m)



Mallet, C., and F. Bretar. 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 1-16

Compromiso entre resolución planimétrica y alcance vertical

Sistemas LiDAR full-waveform

The *Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI)* genera datos LiDAR de alta resolución. Permite obtener mediciones de la altura de la vegetación, estructura vertical y elevación del terreno. Sus aplicaciones más importantes son el estudio de los ciclos del **carbono** y del agua, **biodiversidad** y hábitat, y la generación de **MDT** más precisos.

Compuesto de 3 láseres que generan 10 líneas paralelas de observaciones. Cada láser obtiene **25-m footprint**. Cada *footprint* separado 25 m a lo largo de la línea y 600 m transversalmente a ella.

GEDI se encuentra en la Estación Espacial Internacional desde finales de 2018

<https://science.nasa.gov/missions/gedi>

Pregunta

¿Cuál es el **balance de C** en los bosques?



Cuantificar

Biomasa

Dinámica forestal

¿Cuál es el potencial de la superficie para **mitigar el CO₂** atmosférico?



Potencial como sumideros de C

Cómo afecta la estructura forestal al hábitat y **biodiversidad**?

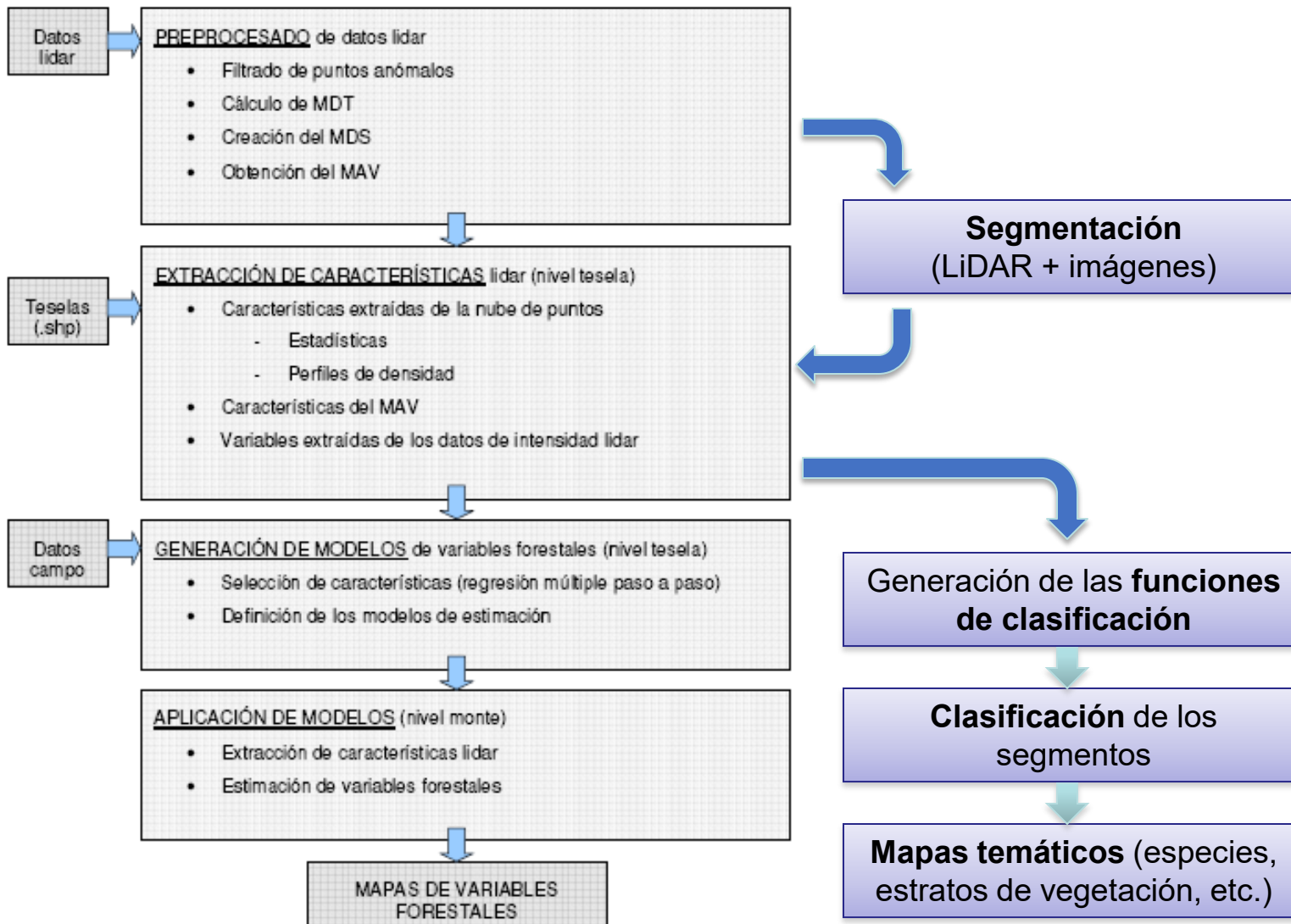


Relación estructura vertical forestal y biodiversidad



Mapas de variables cuantitativas

Mapas temáticos



Zonas de trabajo

A) Cuenca (España)

4.100 ha en la “Serranía de Cuenca”, en la cordillera Central de la Península Ibérica. Altitud (1.100-1.700 m) Pendiente abrupta y vegetación dominante *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*

LiDAR discreto. 102 teselas de campo

A

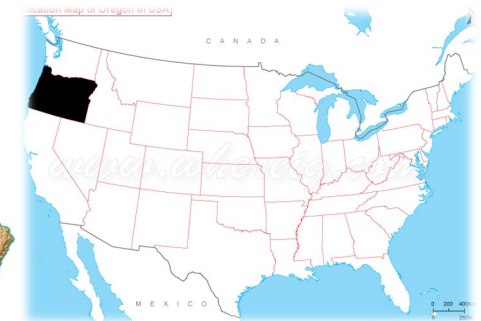


B) Oregon (USA)

2.258 ha en Panther Creek, OR (USA). Coastal mountain range. Altitud (100-700 m). Especies dominantes *Pseudotsuga menziesii* y *Tsuga heterophylla*.

LiDAR Full-waveform. 84 teselas de campo

B



Zona A

Adquisición de los datos LIDAR

Superficie : 4.100 ha

Adquisición: Noviembre 2008

Densidad nominal: 4 ptos/m²

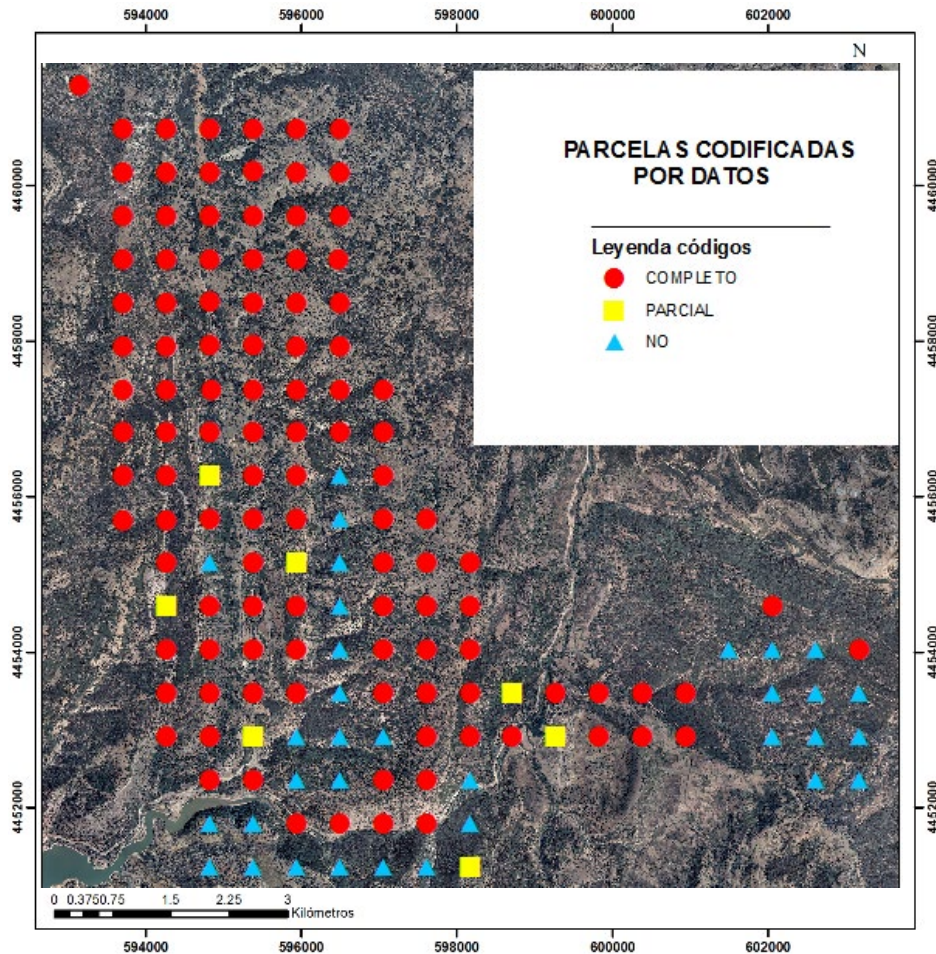
Recubrimiento: 50% (8 ptos/m²)

53 pasadas – altura: 1500 m

106 ficheros (.las) de 1 km² cada uno*

Color	Descripción	% Área
Yellow	Zona sin cobertura de puntos (fuera del área de trabajo)	NA
Red	Densidad inferior a 5 ptos/m2	33.44
Green	Densidad entre 5 y 10 ptos/m2	33.83
Blue	Densidad superior a 10 ptos/m2	32.73

Zona A - Datos de campo



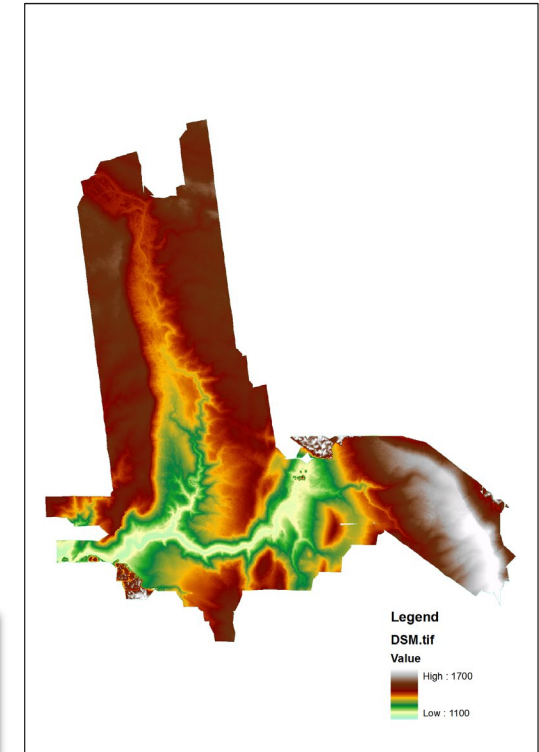
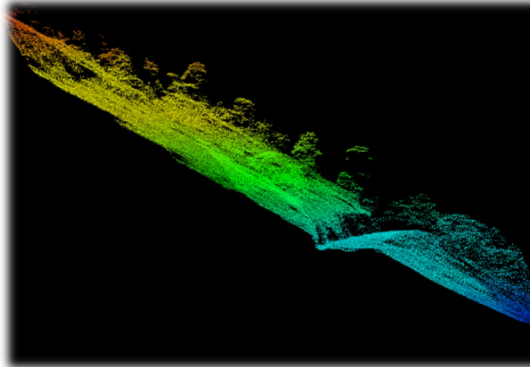
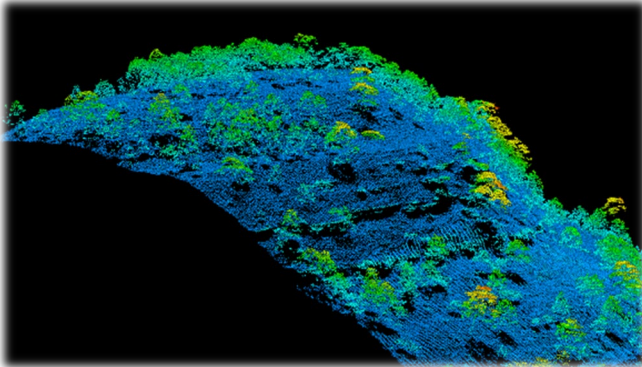
Entre 2008 y 2009 se realizaron mediciones de campo en 102 parcelas circulares de 25 m de radio, distribuidas regularmente sobre la zona de estudio

- Area basimétrica (G , m^2/ha)
- Biomasa total, fuste y raíz (kg/ha)
- Volumen maderable (m^3/ha)
- FCC (%)

Vegetación arbórea dominante:
Pinus nigra, *P. sylvestris* y *P. pinaster*

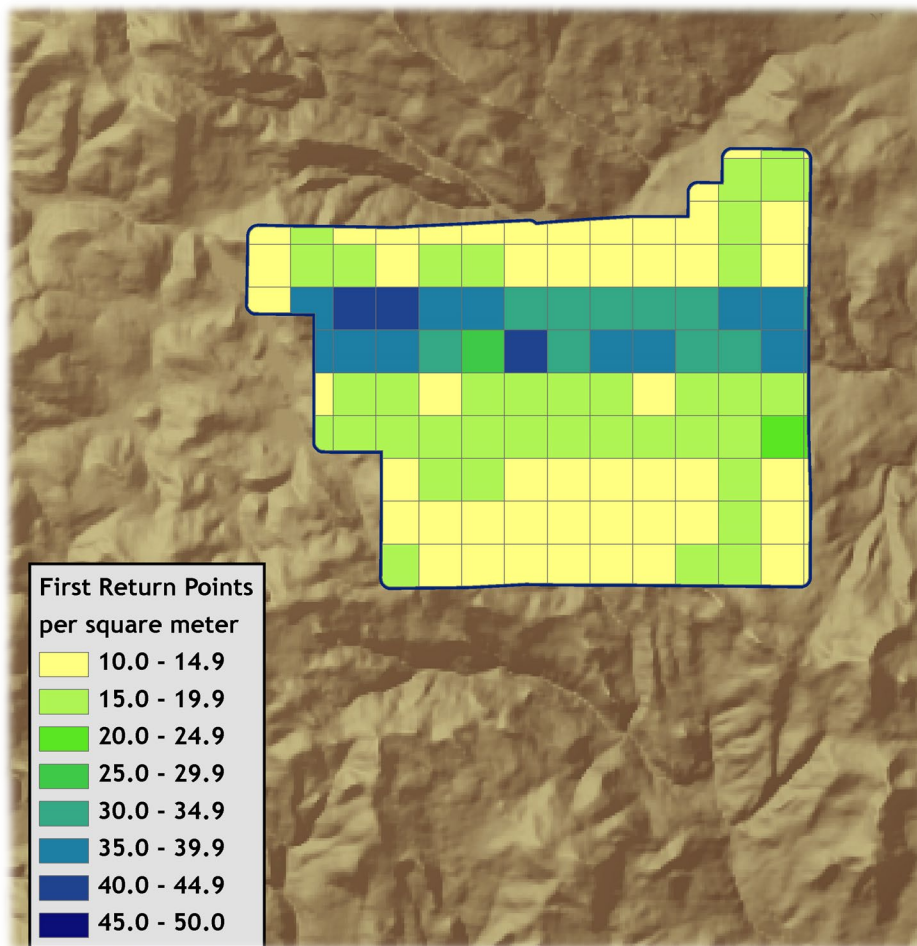
Zona A

Ejemplos de datos LiDAR y pendiente de la zona



MDT

Zona B - Adquisición de datos LIDAR



Fuente: Watershed Sciences, 2010

Superficie : 2.258 ha

Adquisición: Julio, 2010

Densidad media: 20 ptos/m²

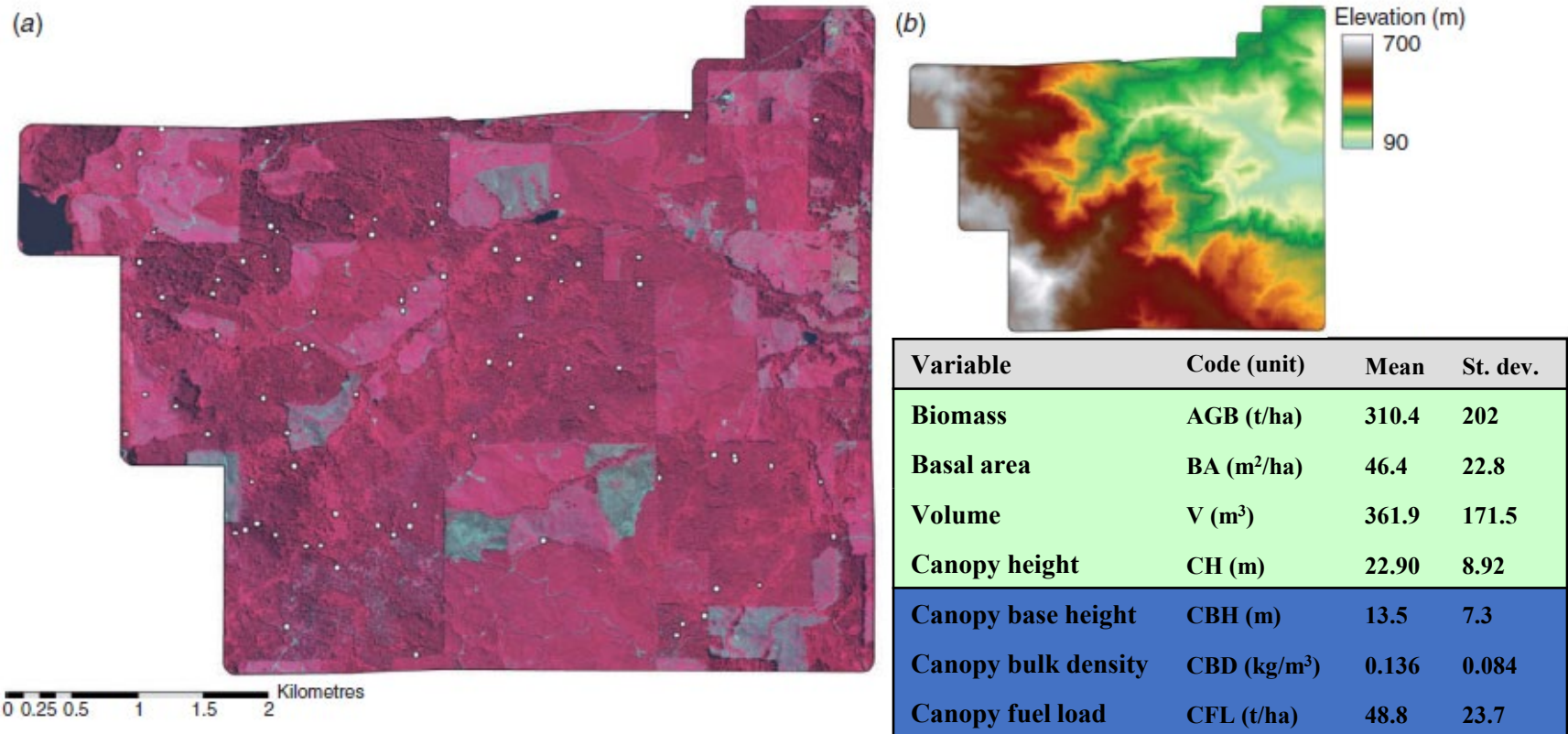
Recubrimiento: 50%

Altura de vuelo: 900 m.

Ángulo de escaneo: $\pm 14^\circ$

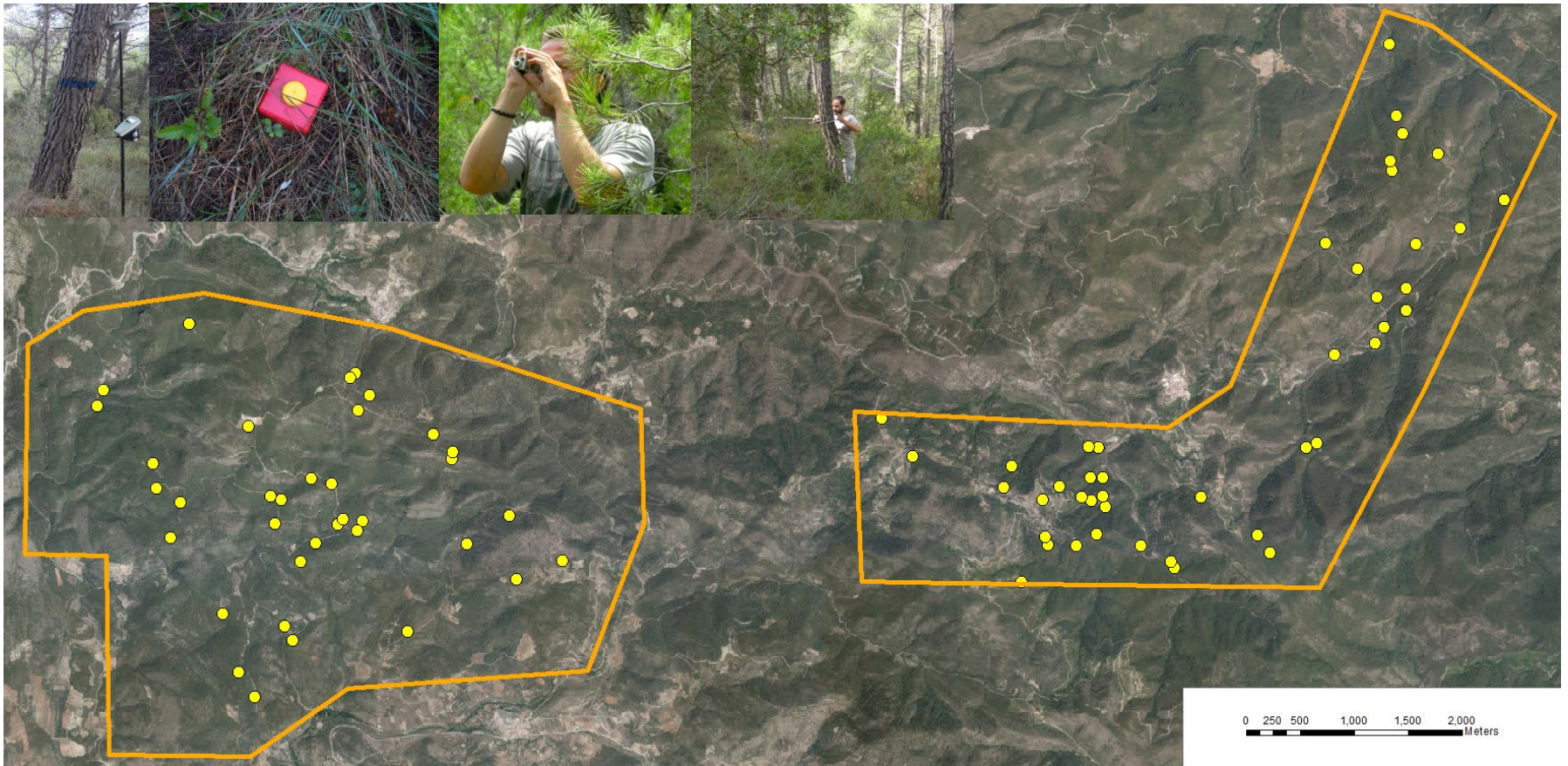
Zona B - Datos de campo

Panther Creek, OR. Adquisición de datos de campo en 84 parcelas circulares de 16 m de radio,



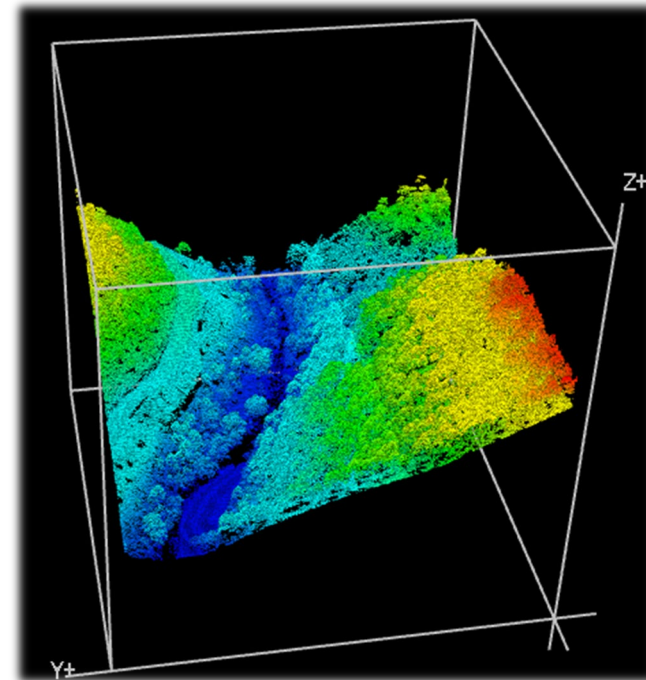
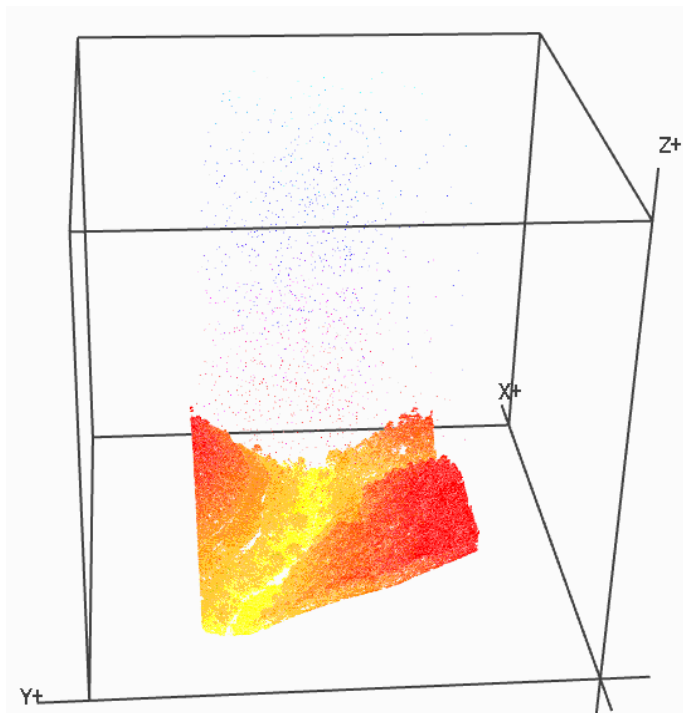
Datos de campo

Mediciones estándar de inventario forestal (DBH, altura y número de árboles, información descriptiva de especies, matorral, etc.) en las parcelas de muestreo.



Preprocesado

FILTRADO INICIAL: Eliminación de puntos anómalos

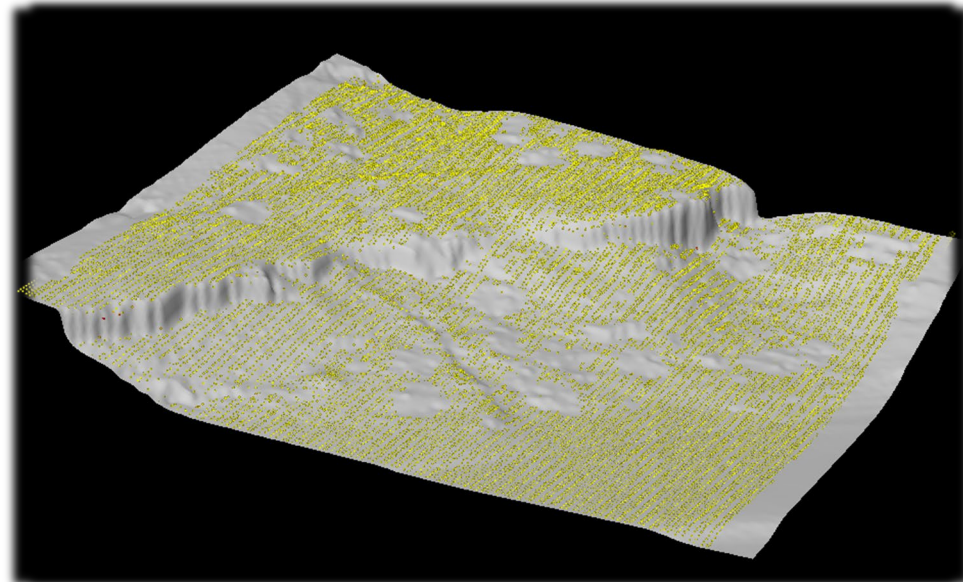
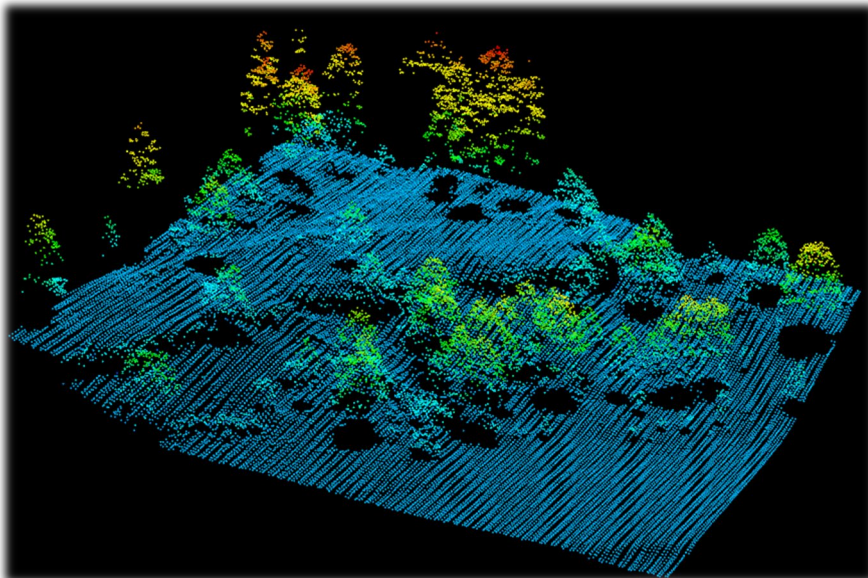


Preprocesado

GENERACIÓN MDT

1-FILTRADO PTOS. TERRENO

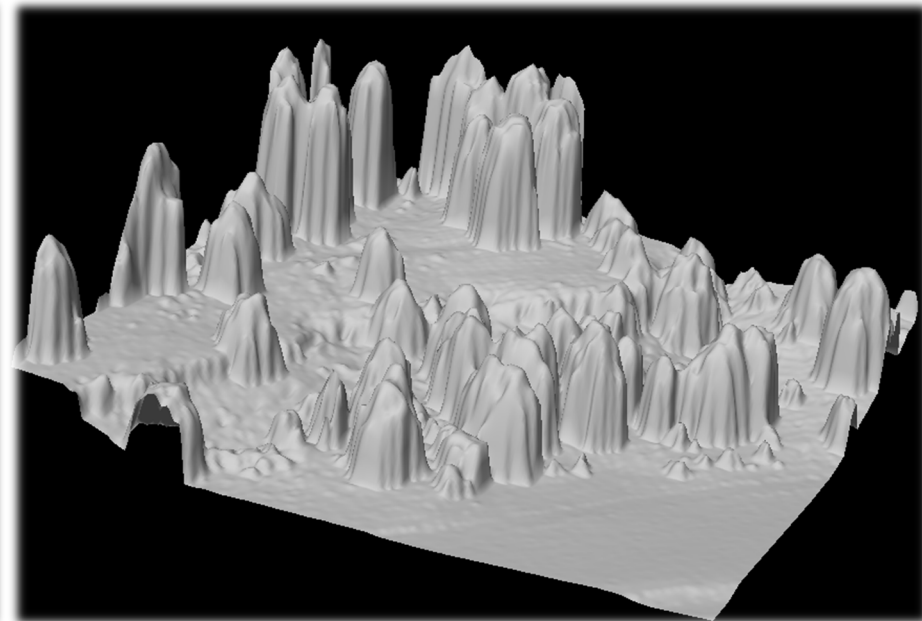
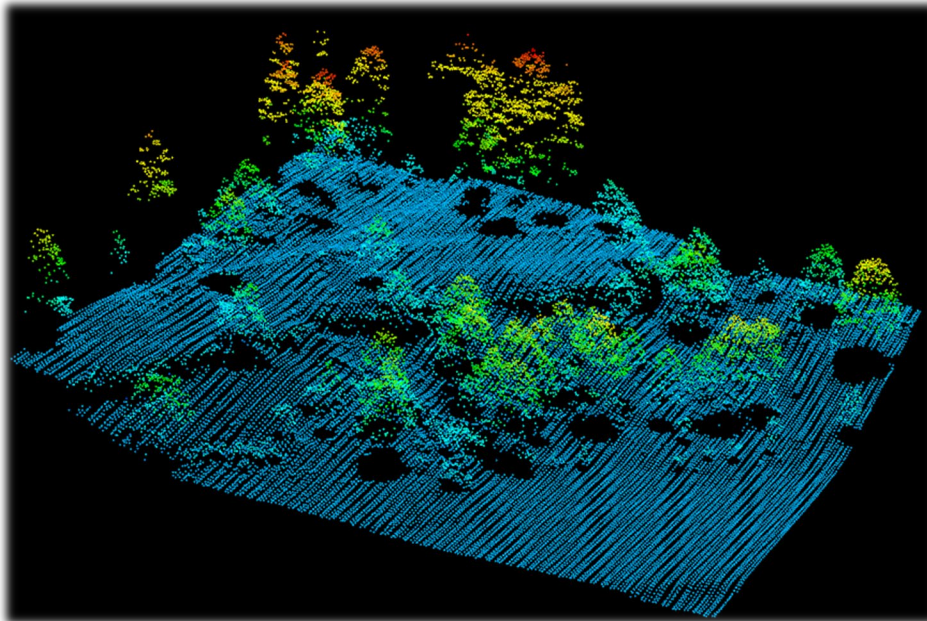
2-INTERPOLACIÓN MDT



Preprocesado

GENERACIÓN

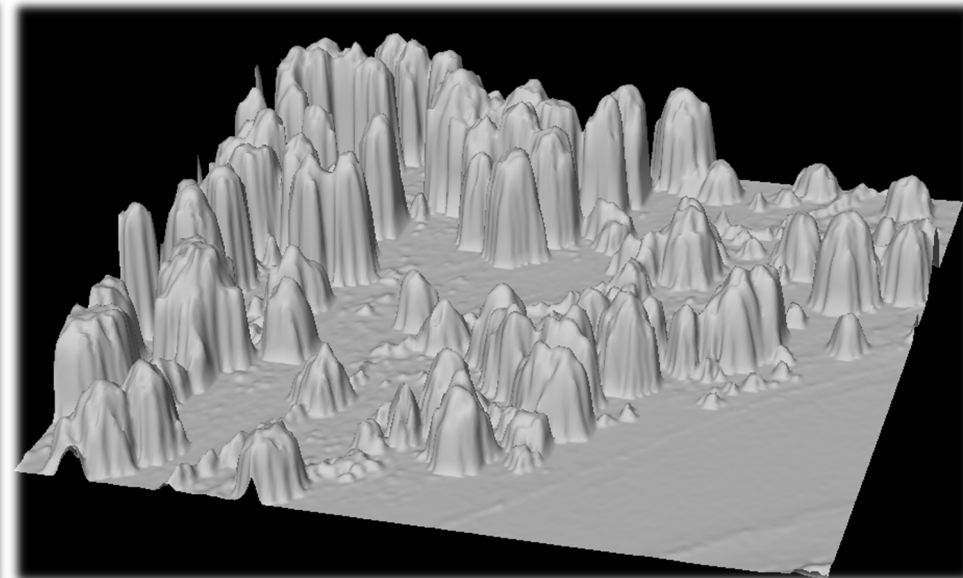
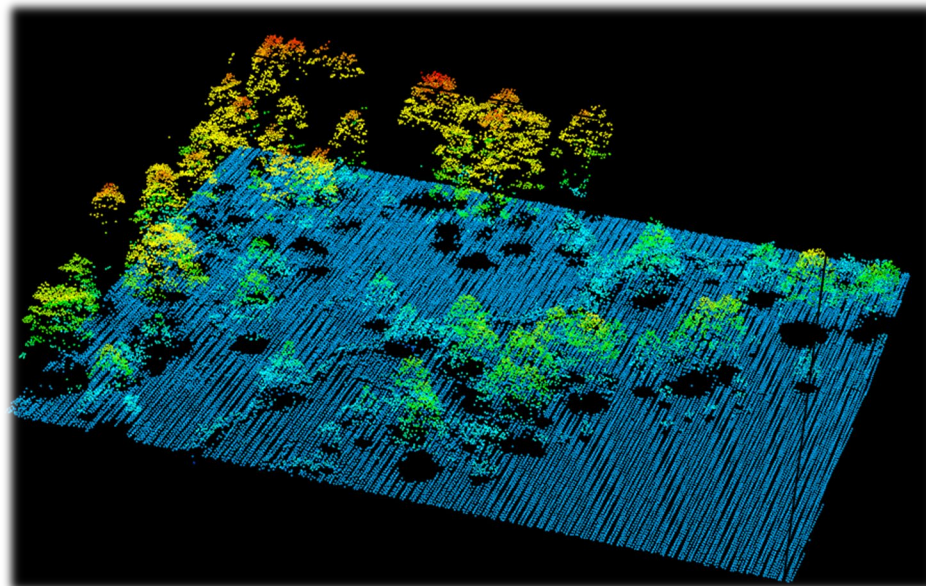
MDS



Preprocesado

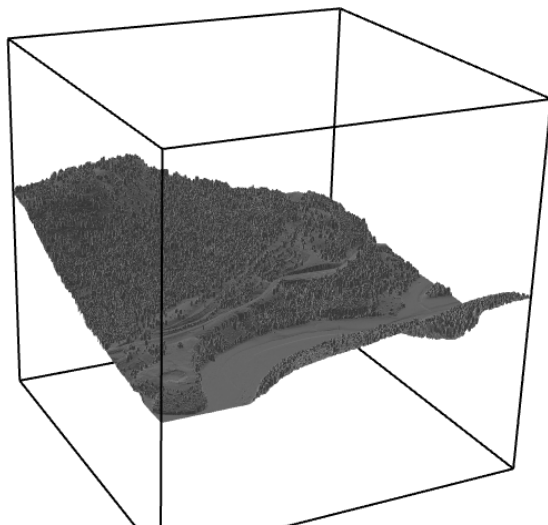
GENERACIÓN nMDS/MAV

CORRECCIÓN CON RESPECTO AL TERRENO:
NORMALIZACIÓN > nMDS/MAV



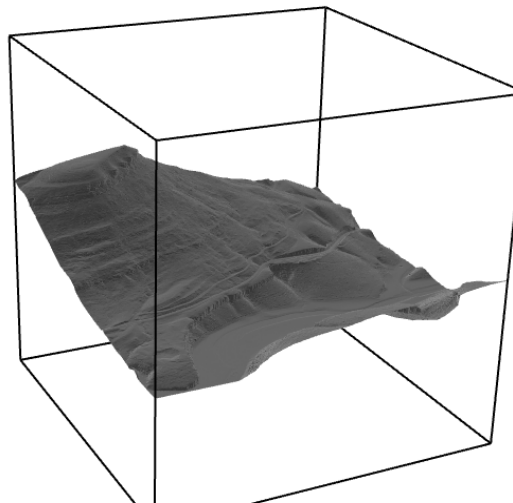
GENERACIÓN nMDS/MAV

CORRECCIÓN CON RESPECTO AL TERRENO:
NORMALIZACIÓN > nMDS/MAV



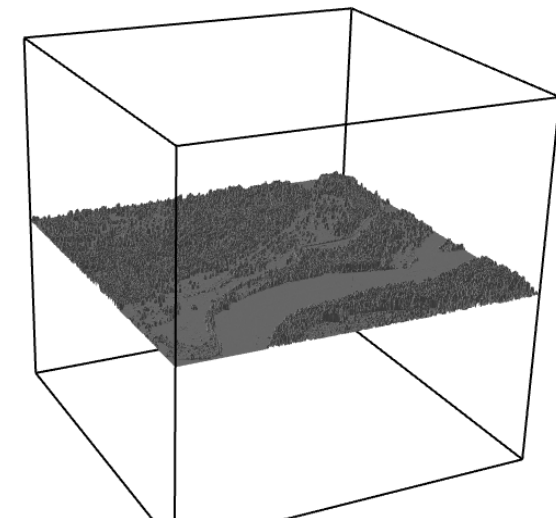
MDS

-



MDT

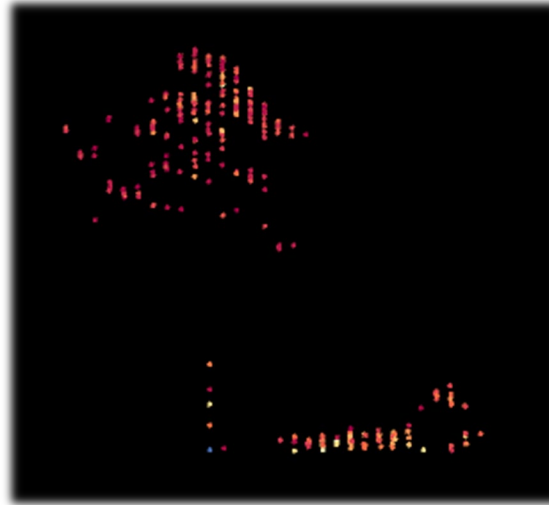
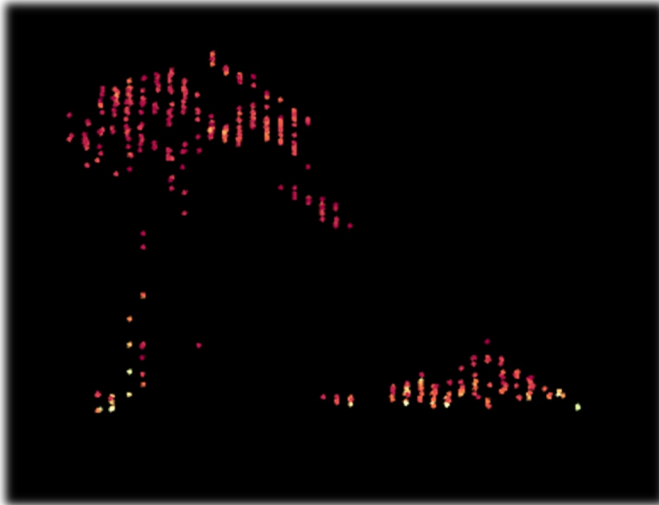
=



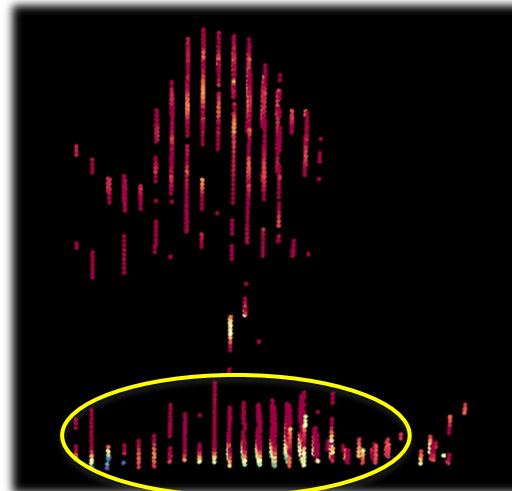
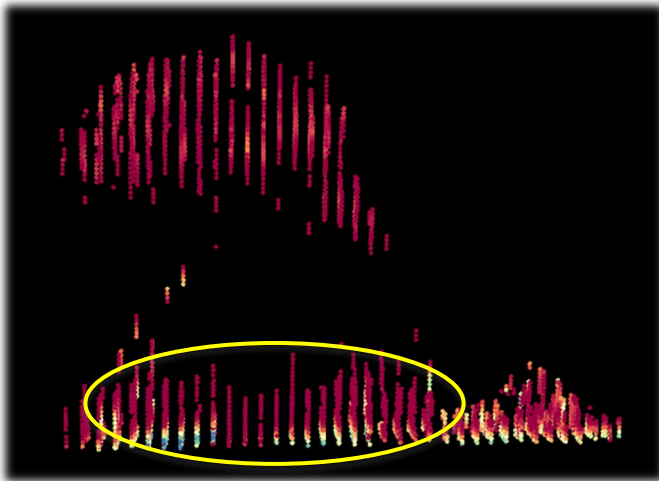
MAV

LiDAR full-waveform: procesado y análisis

Discrete
(intensity)



Full-waveform
(intensity)



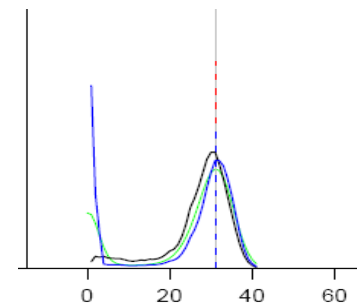
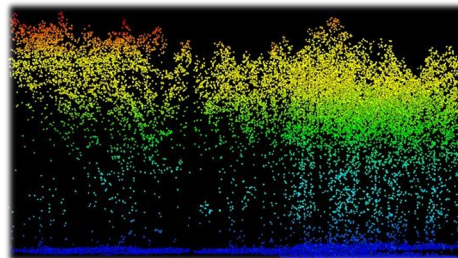
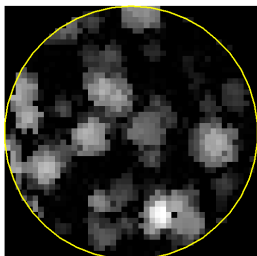
Understory vegetation

Extracción de métricas

(LiDAR discreto)

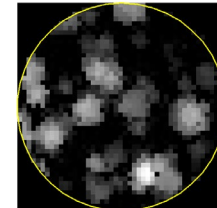
Extracción de características LiDAR (a nivel de parcela):

- A partir del nMDS (MAV)
- A partir de la nube de puntos 3D
 - Estadísticas
 - Perfiles de densidad



Características extraídas del Modelo de Alturas de Vegetación (MAV)

(Estadísticas, texturas)



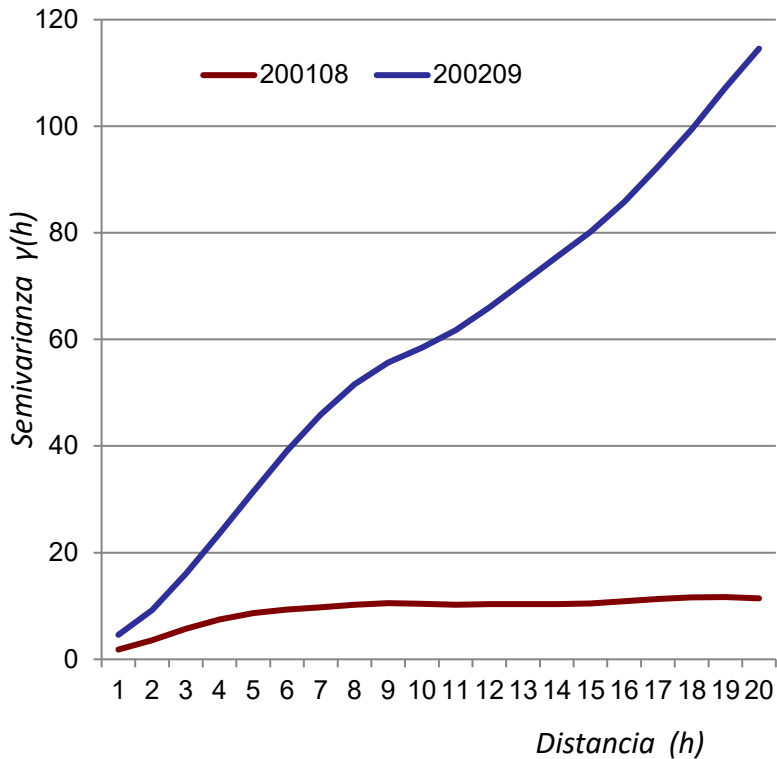
Feature	Description
MEANRASTER	<i>Mean value of the canopy height model (CHM) in the plot</i>
STDVRASTER	<i>Standard deviation of the CHM values in the plot</i>
RANGERAFTER	<i>Range of the CHM values in the plot</i>
KURTRASTER	<i>kurtosis of the CHM values in the plot</i>
SKEWRASTER	<i>skewness of the CHM values in the plot</i>
EDGMEANRAST	<i>Mean value of the “edgeness” for the CHM values in the plot</i>
EDGSTDVRAST	<i>Standard deviation of the CHM “edgeness” values in the plot</i>
SEMIVAR	<i>Features extracted from the semivariogram of heights</i>

Características extraídas del MAV

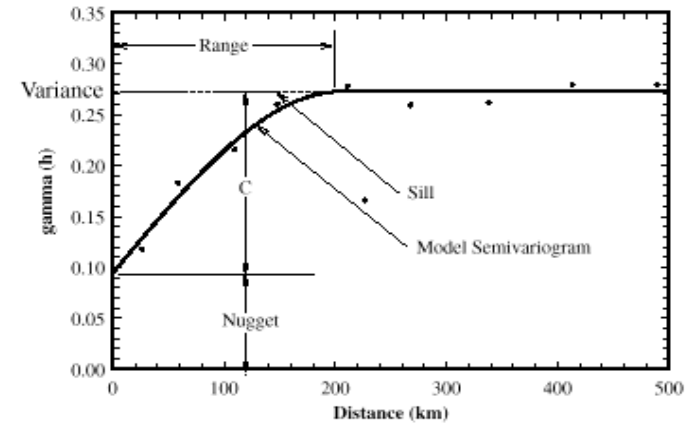
Semivariograma del MAV

Expresa la variabilidad de la distribución espacial de la altura de la vegetación en función de la distancia (h)

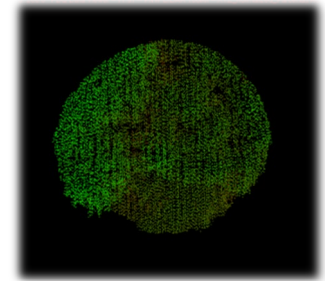
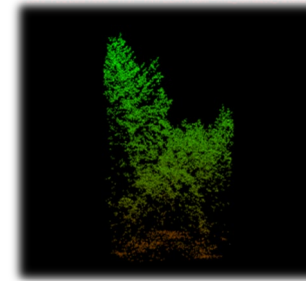
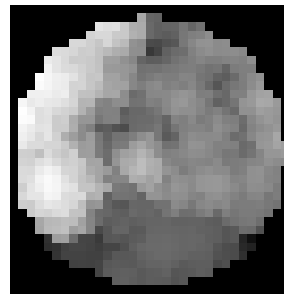
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$



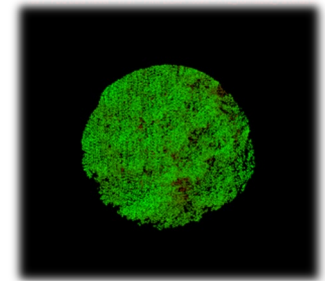
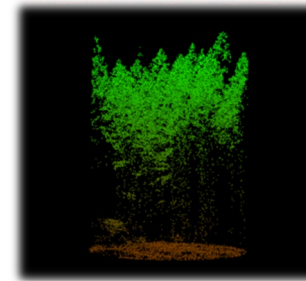
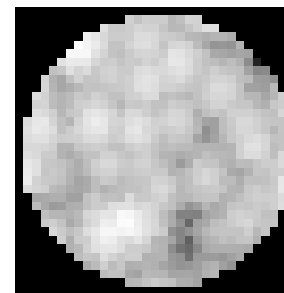
Components of a Semivariogram



200209



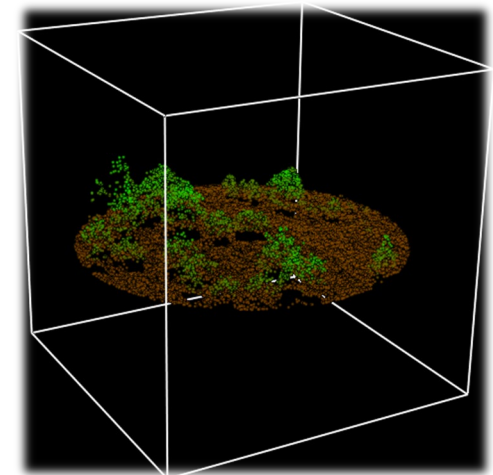
200108



Características extraídas de la nube de puntos

Estadísticas (*Nº retornos, Mínimo, Máximo, Media, Mediana, Moda, Desviación típica, Varianza, Skewness, Distancia entre cuartiles, Kurtosis, Percentiles (5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 y 95), % de retornos sobre determinadas alturas*)

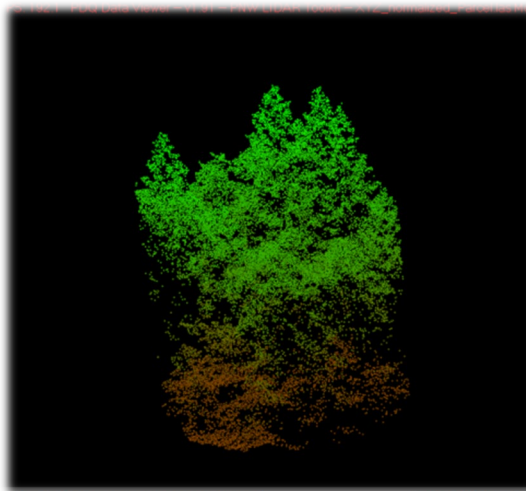
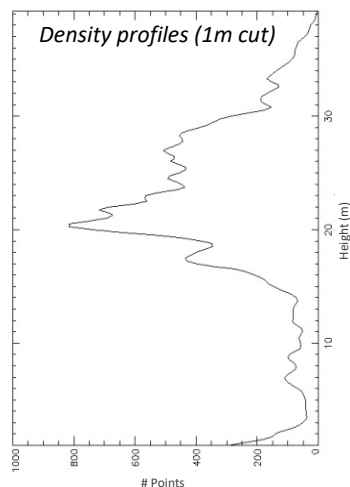
	Feature	Description
Estadísticas básicas	MEANXYZ	Height mean of all the points in the plot
	STDVXYZ	Height standard deviation of all the points in the plot
	RANGEXYZ	Height range (max-min) of all the points in the plot
Nº y densidad de ptos.	KURTOSISXYZ	Height kurtosis of all the points in the plot
	SKEWNESSXYZ	Height skewness of all the points in the plot
	NPOINTS	# points (returns) registered per plot
Percentiles de alturas	PDENSITY	Density of points (returns/m ²) in the plot
	P00H	Height percentile at 0%
	P25H	Height percentile at 25%
	P50H	Height percentile at 50%
	P75H	Height percentile at 75%
	P100H	Height percentile at 100%

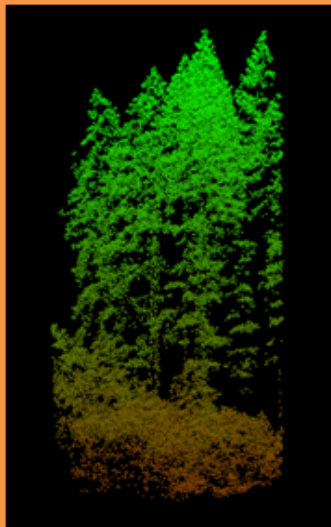


Características extraídas de la nube de puntos

Feature	Description
DENSO	Density of points at height 0
HDMAX	Height maximum in the density profile (height histogram)
PDMAX	Density at height maximum in the density profile
HDMAX2	Height 2 nd maximum in the density profile (height histogram)
PDMAX2	Density at 2 nd height maximum in the density profile

Perfiles de densidad (*Vbles. extraídas a partir de los histogramas de alturas en cada tesela*)



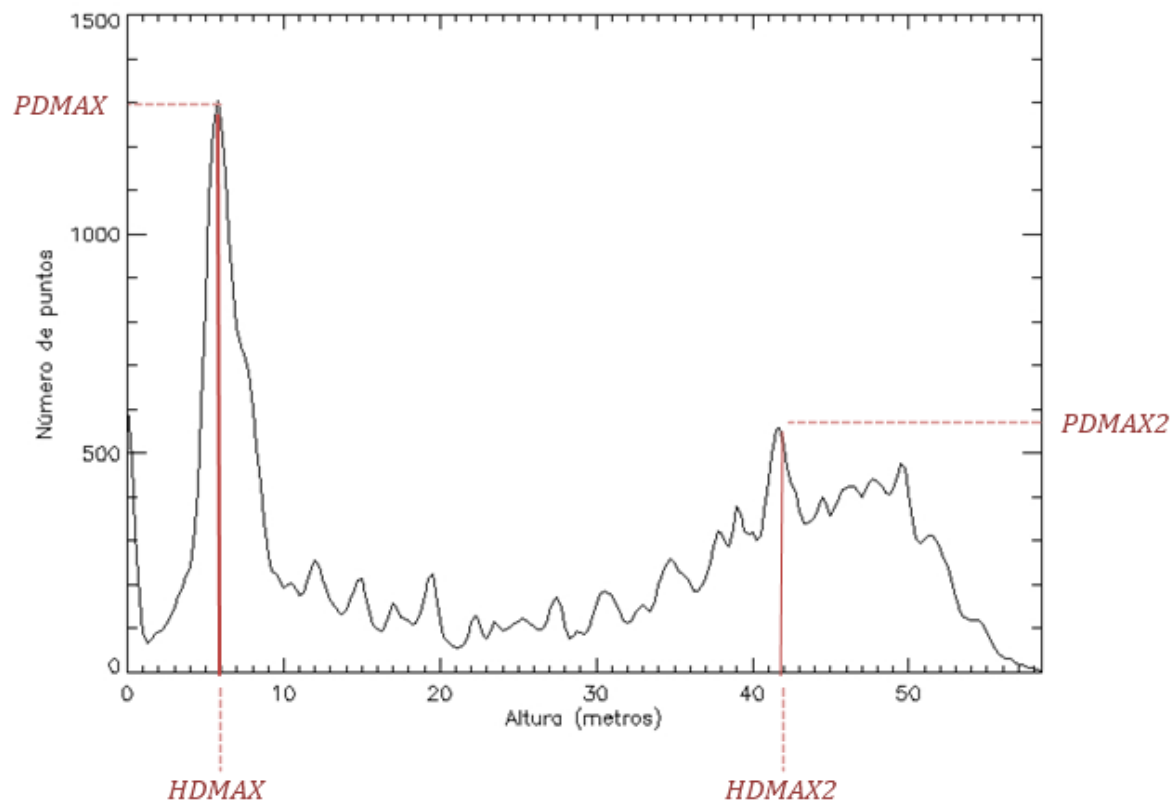


Nube de pto normalizada



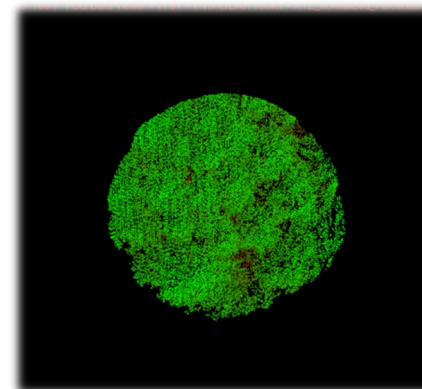
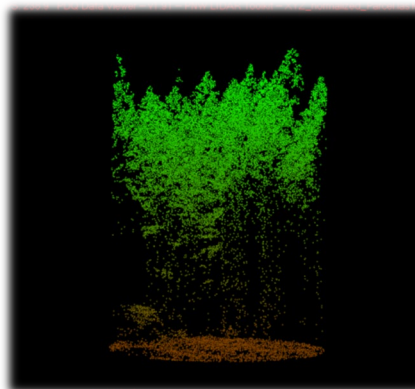
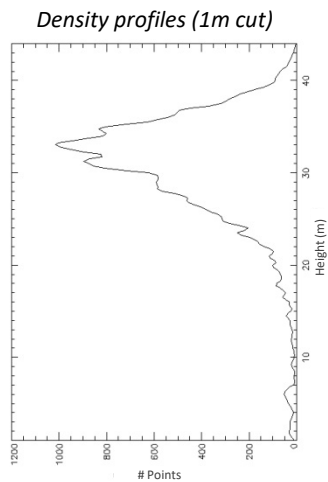
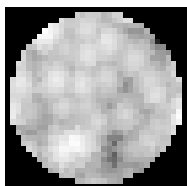
Modelo Alturas Vegetación

Perfiles de densidad

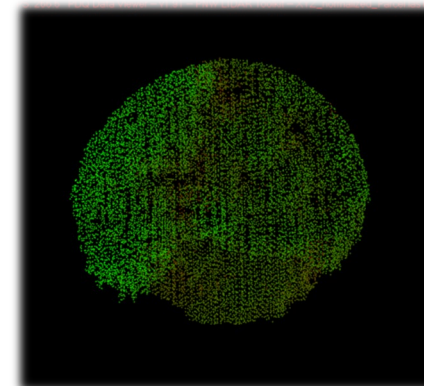
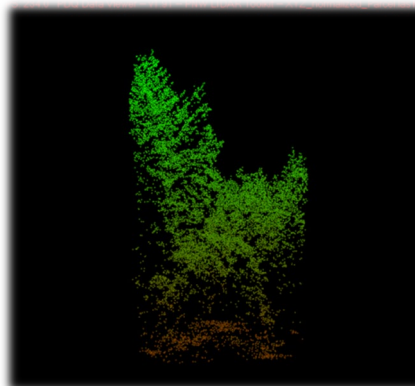
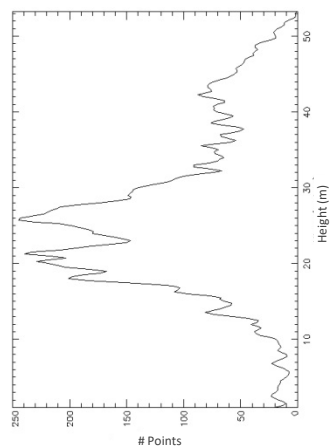
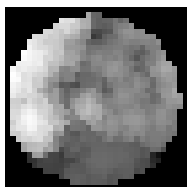


Perfiles de densidad

Plot - 200108

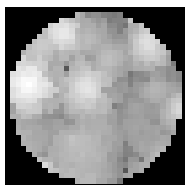


Plot - 200209

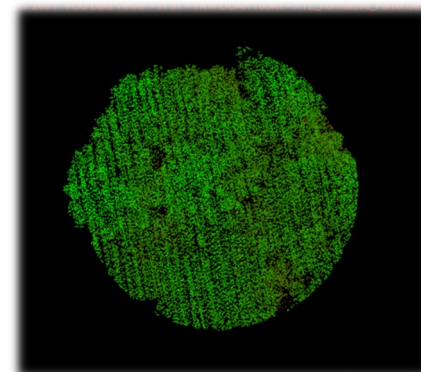
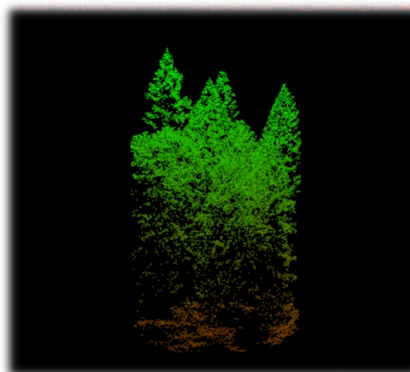
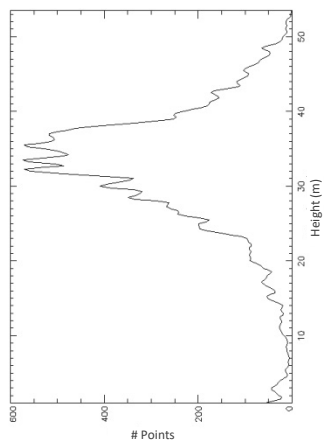


Perfiles de densidad

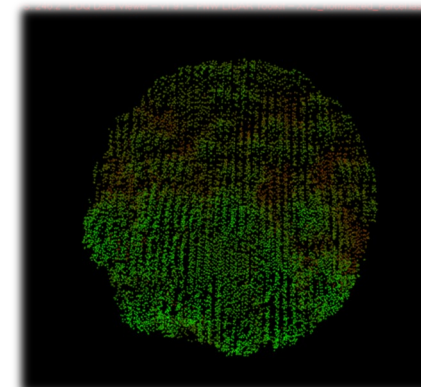
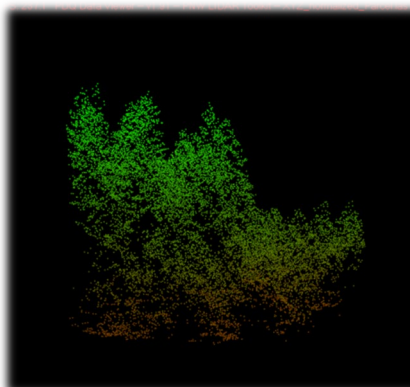
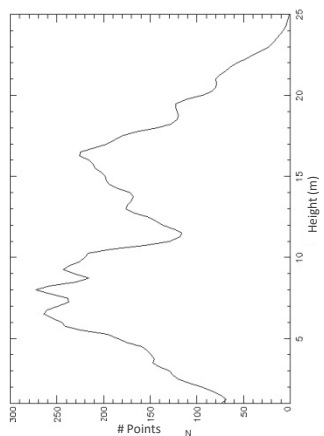
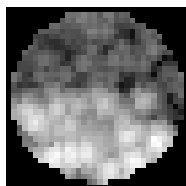
Plot - 300001



Density profiles (1m cut)



Plot - 300002



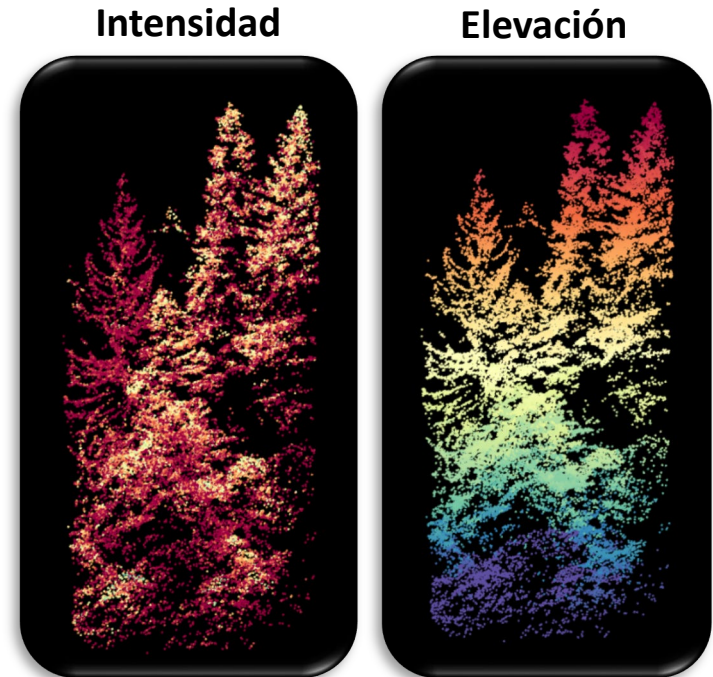
Características extraídas de la intensidad LiDAR

Estadísticas básicas

Percentiles de intensidades

Feature	Description
I_{μ}	Average of the normalized point cloud intensity values
I_{σ}	Standard deviation of the normalized point cloud intensity values
I_{Range}	Range of the normalized point cloud intensity values
I_{Kurtosis}	Kurtosis of the normalized point cloud intensity values
I_{Skewness}	Skewness of the normalized point cloud intensity values
I_{p25}	25th percentile of the normalized point cloud intensity values
I_{p50}	50th percentile of the normalized point cloud intensity values
I_{p75}	75th percentile of the normalized point cloud intensity values
I_{p100}	100th percentile of the normalized point cloud intensity values

LiDAR discreto



Estimación de variables forestales

Características extraídas por tesela



GENERACIÓN DE MODELOS de variables forestales (nivel tesela)

- Selección de características (regresión múltiple paso a paso)
- Definición de los modelos de estimación



APLICACIÓN DE MODELOS (nivel monte)

- Extracción de características lidar
- Estimación de variables forestales

Evaluación



MAPAS DE VARIABLES
FORESTALES

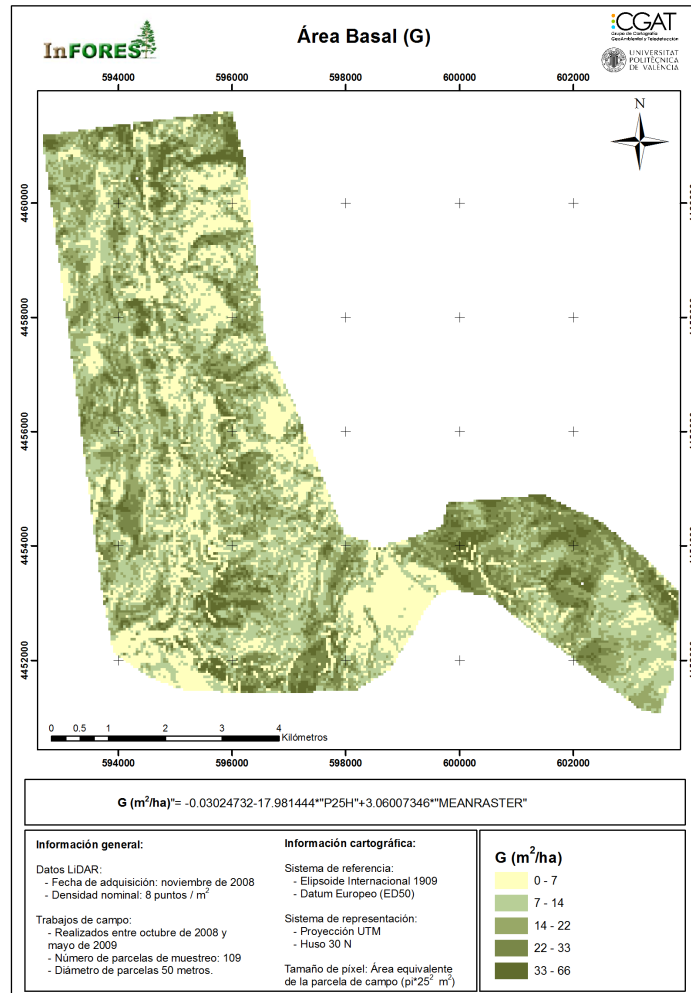
Generación de modelos

Ejemplos de modelos obtenidos en la zona B mediante regresión múltiple, incluyendo un máximo de 3 variables independientes para la estimación de cada variable forestal o de combustibilidad. Puede apreciarse la complementariedad de los distintos tipos de características obtenidas mediante datos LiDAR.

Variable (unit)	Model	Adjusted R ²	RSME	nRSME
AGB (t/ha)	$- 73.48 + 20.828 \times H_{\mu} + 74.754 \times I_{\text{Kurtosis}} + 10.133 \times \text{CHM}_{\text{Kurtosis}}$	0.84	79.04	0.09
BA (m ² /ha)	$- 4.865 + 7.532 \times H_{\mu} - 2.906 \times H_{p50} - 1.303 \times \text{CHM}_{\mu}$	0.76	10.89	0.11
V (m ³)	$65.044 + 7.617 \times \text{CHM}_{\text{Kurtosis}} + 18.568 \times \text{HOME}_{\mu} - 9.466 \times \text{HTMR}_{\sigma}$	0.73	86.37	0.10
CH (m)	$3.323 + 1.069 \times \text{HTMR}_{\mu} - 1.509 \times \text{HOME}_{\sigma} + 3.465 \times \text{WD}_{\sigma}$	0.79	4.00	0.09
CBH (m)	$0.377 - 2.135 \times H_{\text{Skewness}} + 0.435 \times H_{p25} + 0.854 \times \text{WD}_{\sigma}$	0.78	3.34	0.09
CFL (t/ha)	$- 5.5 + 7.847 \times H_{\mu} - 3.035 \times H_{p50} - 1.325 \times \text{CHM}_{\mu}$	0.79	860.63	0.10

Hermosilla, T., et al., 2014. Estimation of forest structure and canopy fuel parameters from small-footprint full-waveform LiDAR data. *International Journal of Wildland Fire*, 23(2)

Cartografía de variables forestales



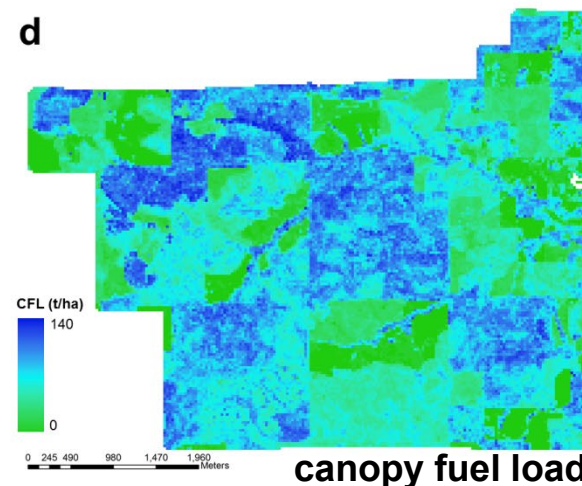
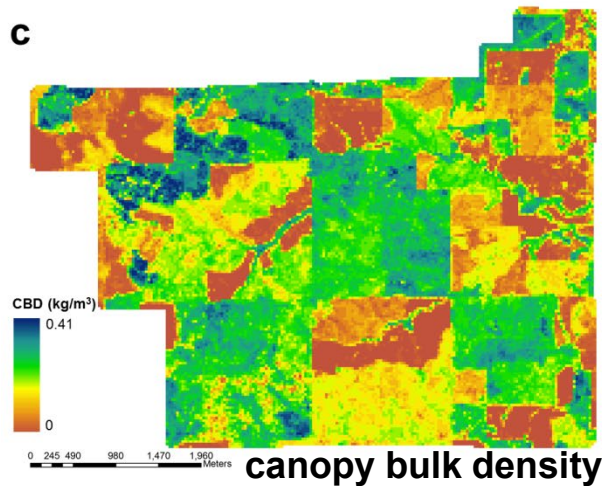
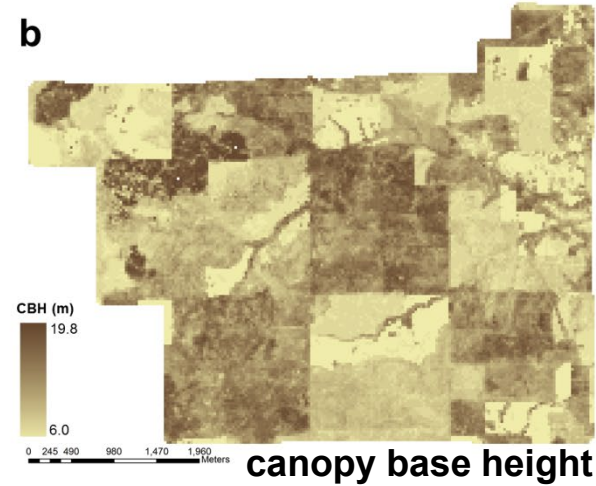
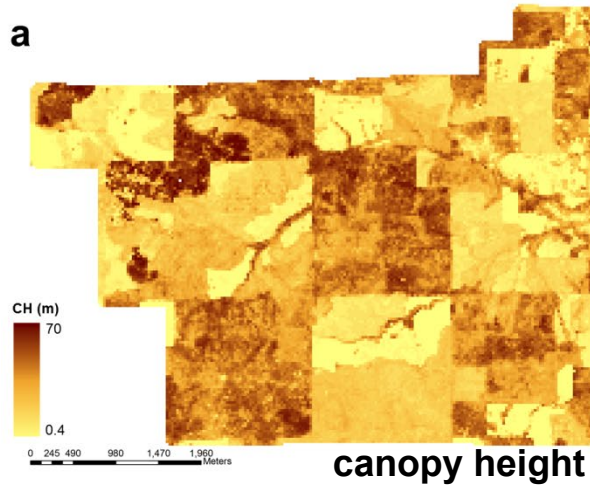
Generalización de los modelos a zonas extensas.

Conveniencia de aplicación de modelos por estratos

Tamaño de píxel: Área equivalente a las parcelas de campo [$\pi (25^2) m^2$] (aprox. 44,3 m/píxel)

- *Area basimétrica (G, m²/ha)*
- *Biomasa total, fuste y raíz (kg/ha)*
- *Volumen (m³/ha)*
- *FCC(%)*

Cartografía de variables de combustibilidad



Hermosilla, T., et al., 2014. Estimation of forest structure and canopy fuel parameters from small-footprint full-waveform LiDAR data. *Intl. Journal of Wildland Fire*, 23(2)

Mapas temáticos

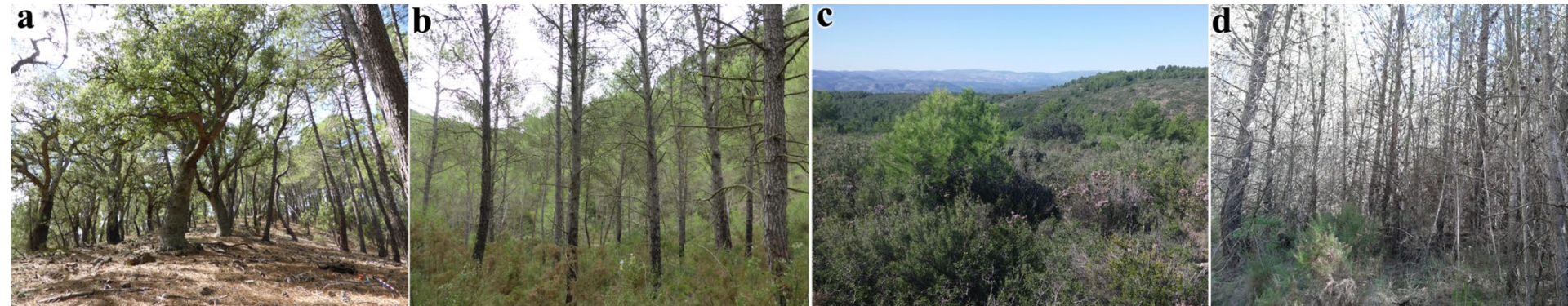
Clasificación en tipologías estructurales de vegetación

Datos:

LiDAR Plan Nacional Ortofotografía Aérea (0.5 pts.m⁻²); WorldView-2;

Sentinel-2

Inventario de campo



Clasificación de cuatro **tipos genéricos de estructura forestal** :

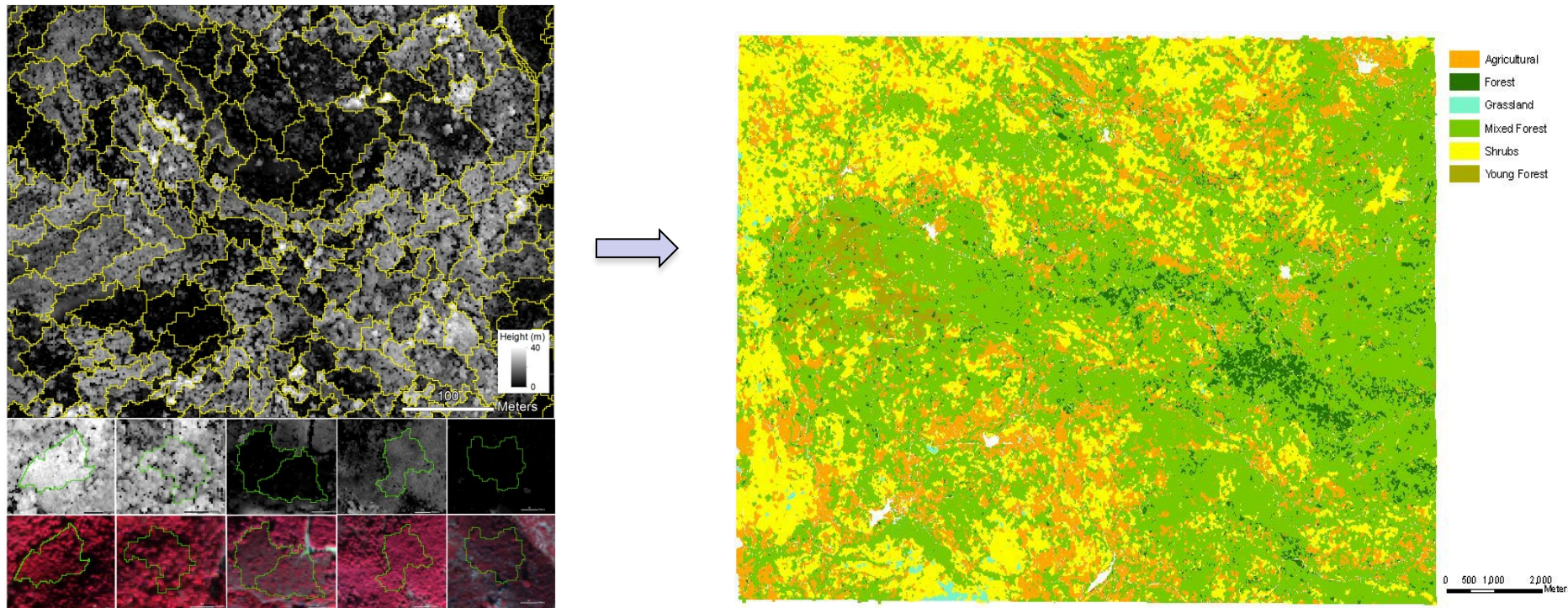
a) *forest*; b) *mixed forest*; c) *shrub*; d) *young forest*

y dos clases adicionales: *agrícola* y *prados*

Mapas temáticos

Clasificación en tipologías estructurales de vegetación

Segmentación > Extracción de características > Clasificación



Ruiz, L.A., Recio, J.A., Crespo-Peremarch, P., Sapena, M., 2018. An object-based approach for mapping forest structural types based on low density LiDAR and multispectral imagery. *Geocarto Intl.* 33(5) 443-457.

Mapas temáticos

Clasificación en tipologías estructurales de vegetación

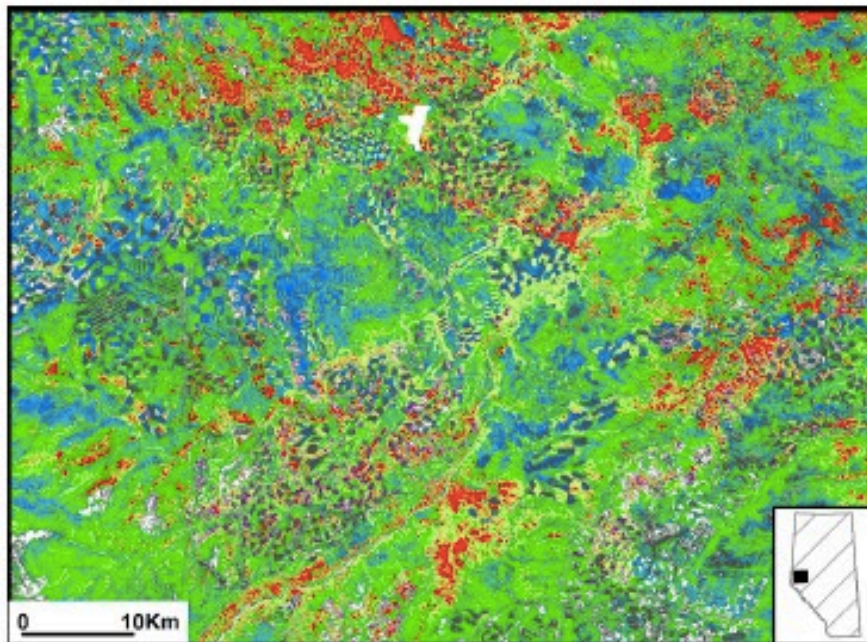
	Overall Accuracy		Kappa Index	
	Weighted (Area)	No. Objects	Weighted (Area)	No. Objects
WV2+Sentinel2+LiDAR	90.75%	86.76%	0.86	0.76
WV2+LiDAR	90.95%	86.44%	0.86	0.78
Sentinel2+LiDAR	90.15%	84.51%	0.85	0.733
WV2	73.04%	69.21%	0.57	0.42
Sentinel2	69.28%	69.58%	0.52	0.44
LiDAR	88.23%	82.20%	0.82	0.69

- Relevancia de los datos LiDAR
- Mejora al integrar LiDAR + imágenes MS

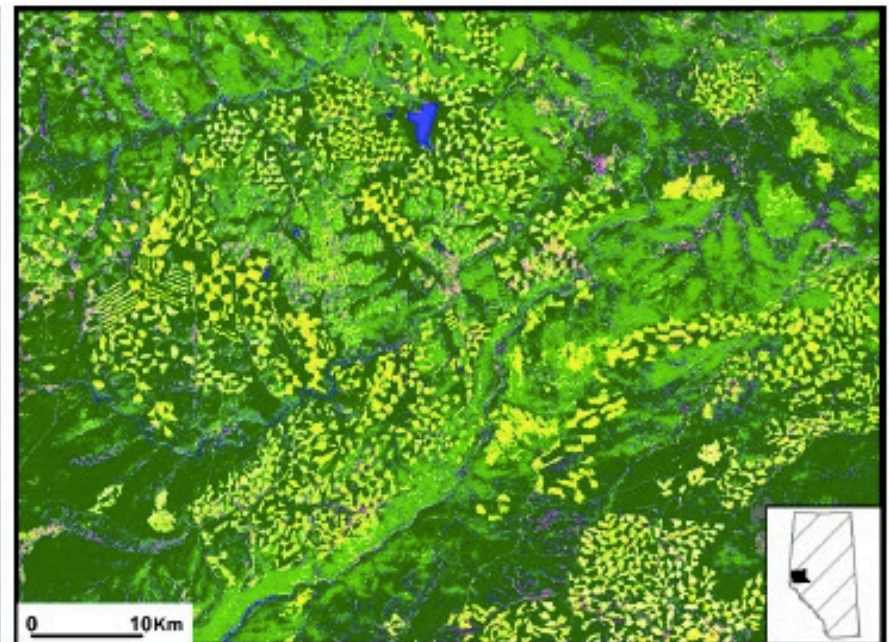
Mapas temáticos (Combinación con otros datos)

Clasificación en tipologías estructurales de vegetación

a) Structure Classification with LiDAR



b) Land cover classification from Landsat



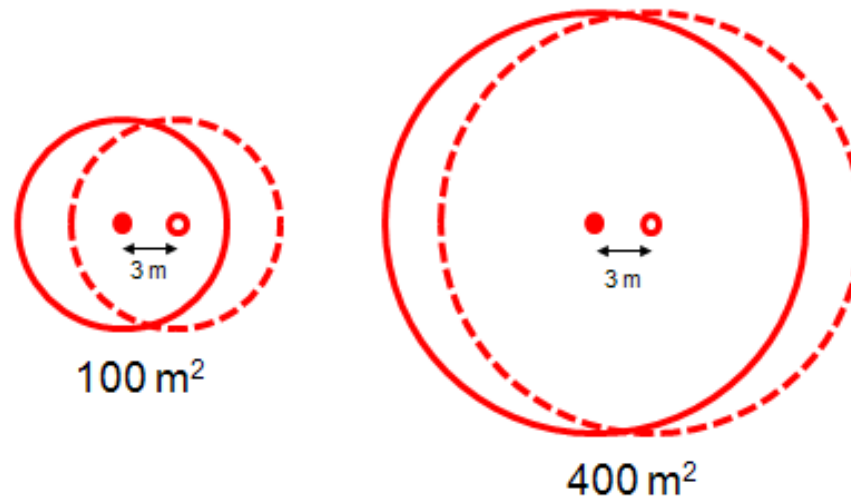
- | | | | |
|---|--------------------------------|---|-------------------------------|
|  | 1: Medium SD Medium Coverage |  | 5: High SD Low Coverage |
|  | 2: Low SD Low Coverage |  | 6: Dominant Height: 10m - 20m |
|  | 3: Dominant Height: 1.37m - 5m |  | 7: Dominant Height: 5m - 10m |
|  | 4: High SD High Coverage |  | 8: Dominant Height: 20m - 30m |

- | | | | | | | | |
|--|---------------------|---|---------------|---|-------------------|---|------------------|
|  | No data |  | Shrub tall |  | Herbs |  | Broadleaf-sparse |
|  | Water |  | Shrub low |  | Coniferous-dense |  | Mixedwood-dense |
|  | Snow/ice |  | Wetland |  | Coniferous-open |  | Mixedwood-open |
|  | Rock/rubble |  | Wetland-treed |  | Coniferous-sparse |  | Mixedwood-sparse |
|  | Exposed/barren land |  | Wetland-shrub |  | Broadleaf-dense | | |
|  | Bryoids |  | Wetland-herb |  | Broadleaf-open | | |

Coops et al., 2016

Influencia de parámetros de adquisición

Tamaño de parcela



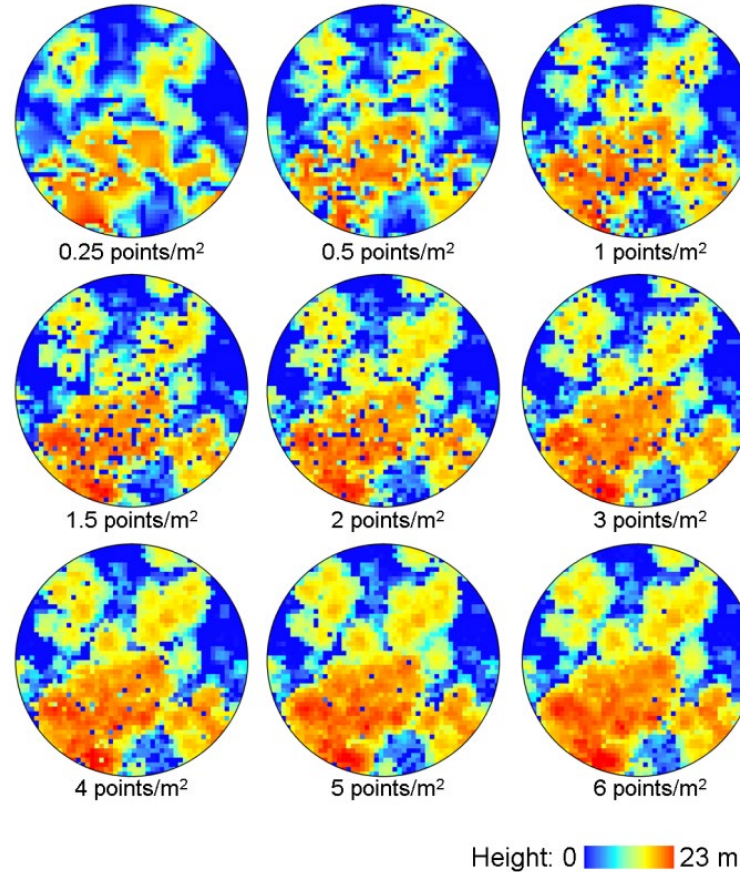
Efecto del tamaño de la parcela sobre el solape existente entre la parcela real en campo (círculos continuos) y la registrada y georreferenciada con un error de 3 m (círculos discontinuos).

El solape entre ambos es del 63% para parcelas de 100 m² (izquierda), aumentando hasta el 82% para parcelas de 400 m² (derecha)

Fuente: White, J.C. et al. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. *Forest. Chron.* **2013**, 89, 722-723

Influencia de parámetros de adquisición

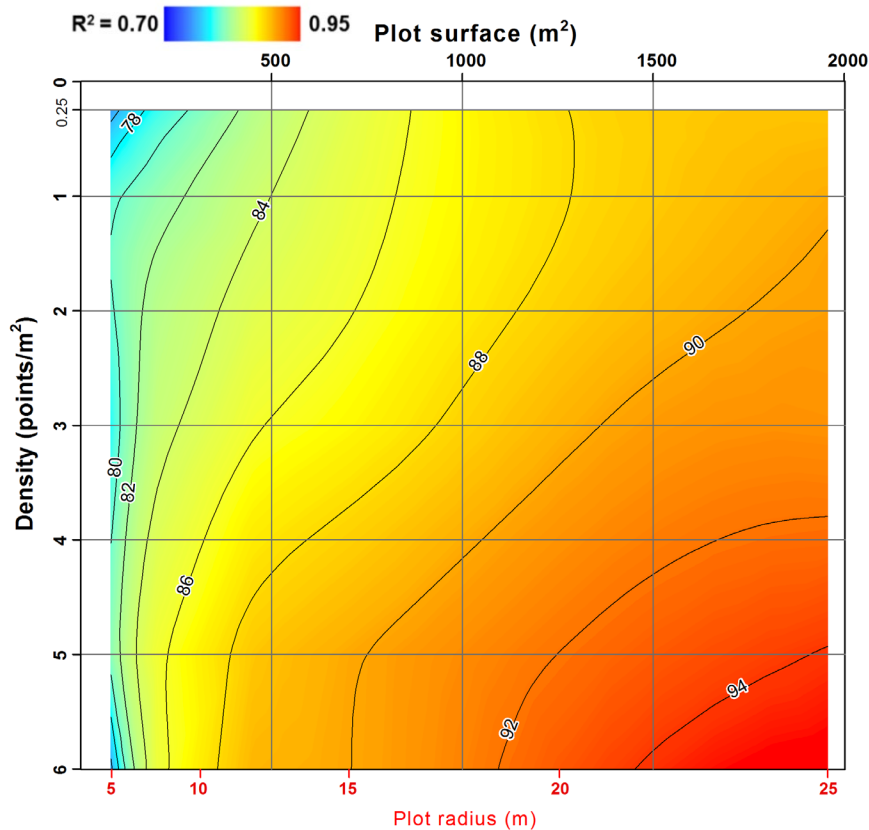
MAV de parcelas de radio 25 m obtenidos al variar progresivamente la densidad de puntos LiDAR (tamaño de píxel 1 m)



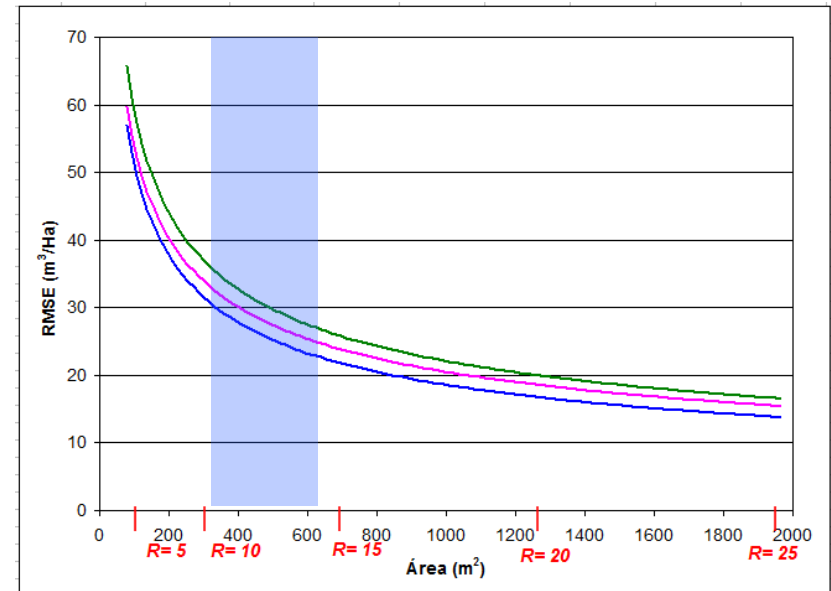
Fuente: Ruiz et al., 2014. Analysis of the influence of plot size and LiDAR density on forest structure attribute estimates. Forests 5(5) 936-951

Análisis de densidades LiDAR y radio de parcelas (Volumen)

Curvas de R^2 en función del radio de parcela y densidad LiDAR

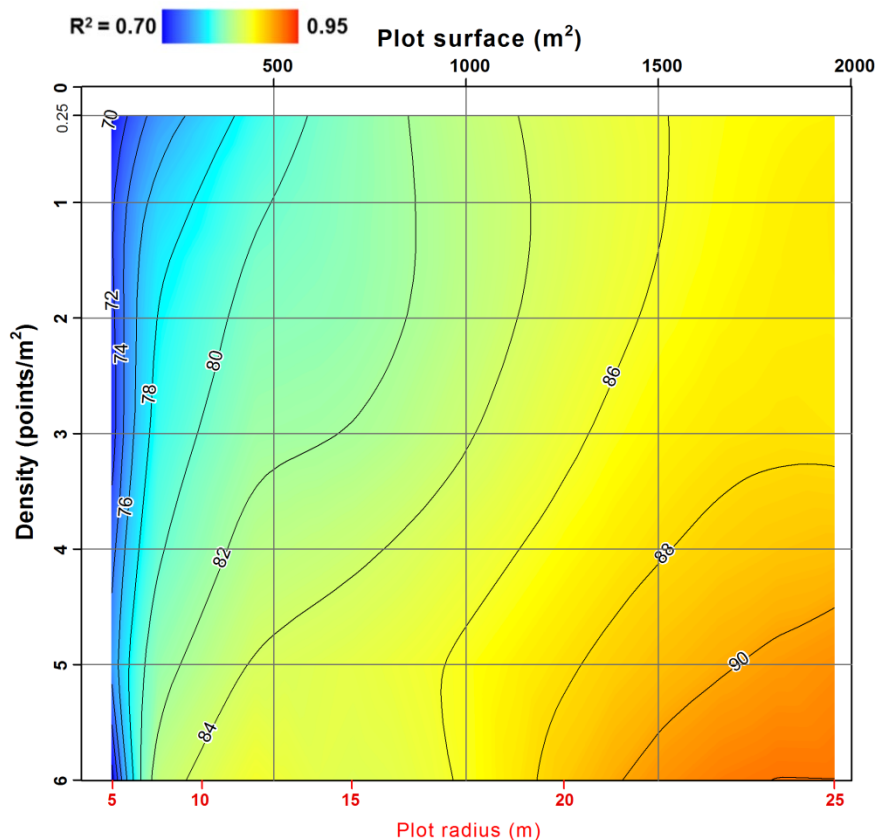


Error medio cuadrático en función del área de la parcela (en rojo el valor del radio en metros). Valores medio, mínimo y máximo del ajuste.

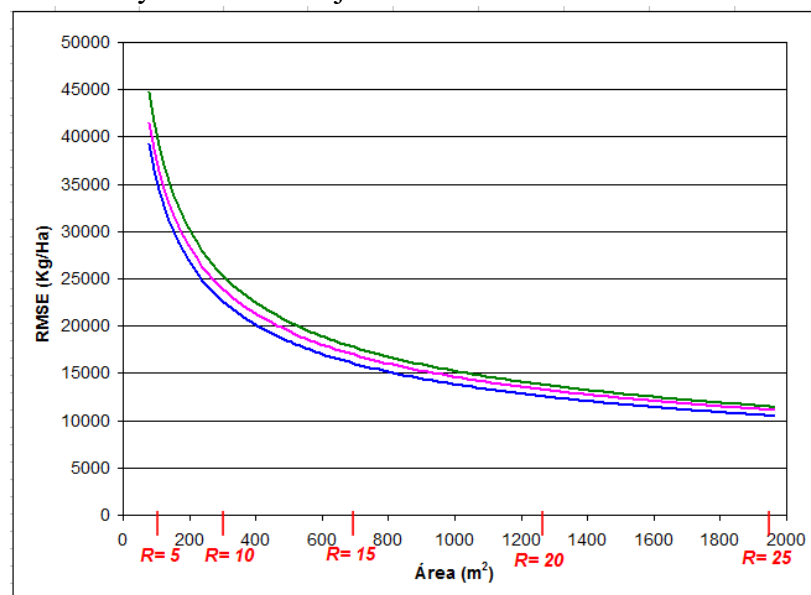


Análisis de densidades LiDAR y radio de parcelas (Biomasa total)

Curvas de R^2 en función del radio de parcela y densidad LiDAR



Error medio cuadrático en función del área de la parcela (en rojo el valor del radio en metros). Valores medio, mínimo y máximo del ajuste.



Conclusiones

- » El estudio de la estructura forestal es útil para optimizar los **recursos** de los bosques, prevenir los **incendios** y modelizar su propagación, y cuidar la **biodiversidad**
- » El uso de sistemas **LiDAR** proporciona grandes oportunidades para la caracterización de la **estructura** de los bosques. El LiDAR full-waveform permite hacerlo de forma más completa > sotobosque.
- » Mediante la metodología adecuada puede obtenerse **cartografía de variables** de estructura y mapas temáticos, de gran utilidad en la gestión sostenible de los bosques.
- » Es importante tener en cuenta los **parámetros de adquisición**, (densidad de pulsos LiDAR, tamaño de parcelas, etc.)

¡MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

**Geo-Environmental Cartography and
Remote Sensing Group**

CGAT

www.cgat.webs.upv.es



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

