

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
Facultad de Geografía e Historia



TRABAJO FINAL
MASTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA

Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS
Desktop 10

Autor: **Antonio San José Albacete**
Director: **Luís Garmendia Salvador**
Codirector: **Francisco Mauro Gutiérrez**

Madrid 2011

Resumen

El presente trabajo pretende mostrar el procesamiento de los datos LiDAR mediante el uso del software de ESRI: ArcGIS Desktop 10. Para ello se aborda una breve introducción a la evolución del sensor LiDAR y las versiones de datos .las, así como un resumen de sus principales aplicaciones en la actualidad.

Por otra parte, se incluye una aproximación al software existente para el tratamiento de datos LiDAR, recopilando una muestra significativa de herramientas orientadas al manejo de archivos .las. Desde los visores básicos hasta los programas desarrollados exclusivamente para trabajar con datos LiDAR, pasando por herramientas creadas para personalizar el software comercial y permitir el tratamiento de archivos .las.

A continuación se realiza una visión del tratamiento de los datos en ArcGIS Desktop 10, partiendo del acceso a la información, los contenidos que se pueden visualizar y las herramientas disponibles para manejar la información. En este punto se ha desarrollado un modelo de geoprocésamiento que permite realizar una primera depuración automática de los datos y crear dos productos básicos: el Modelo Digital de Superficies y el Modelo Digital de Elevaciones, así como la normalización de los datos.

Finalmente, y a partir de los archivos .las facilitados por el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible, se ha elaborado un procedimiento y un modelo de geoprocésamiento para procesar los datos y permitir su posterior uso en aplicaciones forestales: cálculo del volumen forestal, estimación de biomasa forestal u otras variables de interés.

Palabras Clave

LiDAR, ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), ArcGIS Desktop 10, archivos .las, shapefile, MDT, MDE, MDS, normalización, biomasa.

Abstract

This paper aims to show the LiDAR's data processing by using ESRI's software ArcGIS Desktop 10. For this reason, a brief introduction to the evolution of LiDAR's sensor and to the different versions of .las data has been included, as well as a summary of its main applications today.

Afterwards, an approximation to the existing software for LiDAR data processing has been included, compiling a representative sample of tools for the management of .las files. From basic viewers to software that has been exclusively developed to work with LiDAR data, including tools that have been developed to customize commercial software and allowing the processing of .las files.

Thereafter, an overview of the data processing with ArcGIS Desktop 10 has been made, taking as a starting point the access to information, the contents that can be displayed and the available tools for managing information. At this point, a geoprocessing model has been developed, which allows to make a first automatic data cleansing and to create two basic products: Digital Surface Model and Digital Elevation Model, as well as data standardization.

Finally, and with the .las files provided by the Research Group on Technologies and Methods for Sustainable Management (Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible), a procedure has been elaborated, as well as a geoprocessing model to process data and to allow its subsequent use in forestry applications as the estimation of forest volume and biomass or other variables of interest.

Keywords

LiDAR, ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), ArcGIS Desktop 10, .las files, shapefile, DTM, DEM, DSM, normalization, biomass.

Agradecimientos

A Pilar

A Luis y Francisco, por su inestimable ayuda y su apoyo para que este trabajo salga adelante.

A Sergio y Eduardo, por sus ánimos y buenos consejos.

Tabla de Contenidos

PARTE I. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Planteamiento y justificación del trabajo	4
1.2. Hipótesis y objetivos	5
1.3. Metodología seguida durante la investigación	6
1.4. Organización del trabajo.....	7
PARTE II. ESTADO DEL ARTE.....	9
CAPÍTULO 2. DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DE LOS DATOS LiDAR.....	11
2.1. Historia del sensor LiDAR	12
2.1.1. Introducción	12
2.1.1. Definición	13
2.2. Adquisición de datos LiDAR	15
2.2.1. Introducción	15
2.2.2. Pasos para la adquisición de datos LiDAR.....	15
2.2.3. Pre-procesado, filtrado y clasificación de los datos brutos.....	16
2.2.4. Generación de modelos digitales	16
2.3. Atributos de los datos LiDAR	18
2.3.1. Introducción	18
2.3.2. Clasificaciones	18
2.3.3. Número de retornos	20
2.4. Formatos	21
2.4.1. Definición del formato .las	22
2.4.2. Tipos de datos	22
2.4.3. Registros de datos de punto	22
2.4.3.1. Formato 0	22
2.4.3.2. Formato 1	23
2.4.3.3. Formato 2	23
2.4.3.4. Formato 3	24
2.4.3.5. Formato 4	24
2.4.3.6. Formato 5	25
2.4.3.7. Comparación entre formatos.....	26
2.4.4. Información de georreferenciación.....	26

2.5. Proceso de control de calidad	27
2.5.1. Métodos de validación	27
2.5.2. Especificaciones de precisión	28
2.5.3. Revisión cualitativa de los datos LiDAR.....	29
2.5.4. Metadatos.....	29
2.6. Una aproximación a las aplicaciones LiDAR	30
2.7. Tendencias futuras	32
2.7.1. Desarrollo tecnológico actual	32
2.7.2. Desarrollo tecnológico futuro	34

CAPÍTULO 3. APROXIMACIÓN AL SOFTWARE EXISTENTE PARA EL TRATAMIENTO DE DATOS LiDAR 35

3.1. Software comercial	36
3.1.1. ArcGIS 10 y sus extensiones para el tratamiento de datos LiDAR.....	37
3.1.1.1. LP360	37
3.1.1.2. LiDAR Analyst 5.0 for ArcGIS	39
3.1.2. Global Mapper 11	40
3.1.3. FME	40
3.2. Software gratuito	42
3.2.1. LASEdit	42
3.2.2. Fugro Viewer	43
3.2.3. FUSION/LDV	44
3.3. Software libre	45
3.3.1. gvSIG con la extensión Dielmo Open LiDAR	45
3.3.2. libLAS y LASTools	46
3.3.2.1. libLAS	46
3.3.2.2. LASTools	46
3.3.3. Herramientas LiDAR Solutions	47
3.3.4. FELIS Analyst	48

PARTE III. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN 49

CAPÍTULO 4. TRATAMIENTO DE DATOS LiDAR EN ARCGIS 10 51

4.1. Acceso a la información de los datos LiDAR	52
4.1.1. Introducción.....	52
4.1.2. Atributos de los datos LiDAR	52
4.1.3. El problema de la altura.....	52
4.2. Soluciones para el tratamiento de los datos LiDAR en ArcGIS 10.....	53
4.2.1. Visualización de los datos LiDAR en ArcGIS 10	53
4.2.1.1. La herramienta Point File Information	53
4.2.1.2. La herramienta LAS To Multipoint	54
4.2.1.3. Conversión de multipuntos a puntos: la herramienta Multipart To Singlepart	56
4.2.2. Visualización del atributo de elevación en ArcGIS 10.....	58
4.2.2.1. La herramienta Add XY Coordinates	58
4.2.2.2. Los Scripts de ESRI Support	58
4.2.2.3. Aplicaciones fuera del entorno de ArcGIS 10	60
4.3. Modelo de geoprocésamiento de datos LiDAR.....	61
4.3.1. Modelo de creación del espacio de trabajo.....	61

4.3.2. Modelo de carga de datos LiDAR en ArcGIS	62
4.3.2.1. Modelo de carga de datos con herramientas de ArcGIS	62
4.3.2.2. Modelo de carga de datos con herramientas de ArcGIS y script de ESRI Support	63
4.3.2.3. Creación del botón ExplodeLASMultipoint	64
CAPÍTULO 5. APLICACIONES FORESTALES CON DATOS LiDAR.....	67
5.1. Las necesidades del Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible	68
5.2. Proceso de normalización.....	69
5.2.1. Herramientas del proceso de normalización.....	70
5.2.1.1. Selección de los puntos clasificados como suelo.....	70
5.2.1.2. Interpolación. Inverse Distance Weighted (IDW)	70
5.2.1.3. Extraer valores de elevación con la herramienta Extract Values to Points.....	71
5.2.1.4. Añadir un nuevo campo con la herramienta Add Field	71
5.2.1.5. Calcular los valores para el campo recién creado con la herramienta Calculate Field	72
5.2.2. Modelo de normalización	72
5.3. Aplicación forestal.....	74
5.3.1. Introducción.....	74
5.3.2. Obtención de variables forestales	76
5.3.2.1. Variables independientes/auxiliares.....	77
5.3.2.2. Variables dependientes	77
5.3.2.3. Comparación de variables.....	78
5.3.3. Modelo de estimación de la biomasa.....	78
5.3.3.1. Modelo aplicado a las parcelas	79
5.3.3.2. Modelo aplicado al área de estudio.....	80
5.4. Aplicación a un caso de estudio	82
5.4.1. Carga de datos.....	82
5.4.2. Normalización.....	83
5.4.3. Análisis forestal	84
5.4.3.1. Parcelas	84
5.4.3.2. Área de estudio	85
5.4.4. El mapa de volumen forestal y de estimación de biomasa	87
PARTE IV. CONCLUSIONES	89
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES DEL TRABAJO.....	91
6.1. Verificación, contraste y evaluación de los objetivos	92
6.2. Síntesis del modelo propuesto	93
6.3. Aportaciones originales	94
6.4. Trabajos derivados.....	95
6.5. Líneas de investigación futuras	96
BIBLIOGRAFÍA.....	97
REFERENCIAS WEB.....	100

ANEXOS	103
A. CARTOGRAFÍA FORESTAL	105
A.1. Mapa de localización del área de estudio	106
A.2. Mapa de volumen forestal	108
A.3. Mapa de estimación de la biomasa forestal	110

Tabla de Figuras

Figura 1.1. Muestra de datos LiDAR terrestres.....	4
Figura 2.1. Esquema de la captura de datos LiDAR desde un helicóptero	12
Figura 2.2. Esquema de la captura de datos LiDAR desde un avión	13
Figura 2.3. Vista transversal de la nube de puntos: en rojo vegetación y suelo desnudo, en verde líneas de alta tensión	14
Figura 2.4. Esquema de retorno de pulsos láser	14
Figura 2.5. Sensor LiDAR montado en la panza de un avión	15
Figura 2.6. Líneas de ruptura en una zona urbana.....	16
Figura 2.7. Diferencias entre un MDT sin líneas de ruptura y con ellas.....	17
Figura 2.8. Vista transversal de datos LiDAR en 3D.....	18
Figura 2.9. Transepto realizado con datos LiDAR.....	19
Figura 2.10. Esquema de retornos de los pulsos láser	20
Figura 2.11. Ejemplo de un archivo cabecera	22
Figura 2.12. Atributos del formato 0.....	22
Figura 2.13. Atributos del formato 1	23
Figura 2.14. Atributos del formato 2	23
Figura 2.15. Atributos del formato 3	24
Figura 2.16. Atributos del formato 4.....	24
Figura 2.17. Atributos del formato 5	25
Figura 2.18. Esquema de la captura de datos LiDAR en zonas forestales.....	30
Figura 2.19. Ejemplo de datos LiDAR en zonas urbanas	31
Figura 2.20. Datos temporales de muy alta resolución para realizar análisis de detección de cambios (USGS)	33
Figura 2.21. Estación LiDAR Leica.....	33
Figura 2.22. Esquema del uso de sensores LiDAR desde un satélite en órbita.....	34
Figura 3.1. Exportación de archivos .las con LP360.....	37
Figura 3.2. Barras de herramientas de LP360	38
Figura 3.3. Visualización de archivo .las en 2D y de shapefiles 3D	38
Figura 3.4. Visor independiente de ArcGIS de LP360.....	38
Figura 3.5. Visualización de datos LiDAR con LiDAR Analyst	39
Figura 3.6. Visualización de archivo .las con Global Mapper	40
Figura 3.7. Herramienta FME Universal Translator	40
Figura 3.8. Atributos de un shapefile derivado de un archivo .las	41

Figura 3.9. Herramienta LASEdit	42
Figura 3.10. Visualización de archivo .las con LASEdit	43
Figura 3.11. Visualización de archivo .las con Fugro Viewer	43
Figura 3.12. Aplicación de FUSION	44
Figura 3.13. Aplicación de gvSIG	45
Figura 3.14. Herramientas incluidas en LAStools	46
Figura 3.15. Herramientas LiDAR Solutions	47
Figura 3.16. Herramienta Data Area Delineation.....	47
Figura 3.17. Herramienta Canopy Density.....	47
Figura 3.18. Herramienta Countour Noise Filter	48
Figura 3.19. Herramientas FELIS Analyst.....	48
Figura 4.1. Herramientas de análisis 3D	53
Figura 4.2. Ventana de la herramienta Point File Information.....	53
Figura 4.3. Resultados de la herramienta Point File Information.....	54
Figura 4.4. Ventana de selección de códigos de clasificación (LAS to Multipoint).....	54
Figura 4.5. Ventana de selección de valores de retorno (LAS to Multipoint).....	54
Figura 4.6. Ventana de selección de atributos (LAS to Multipoint)	55
Figura 4.7. Selección de sistema de coordenadas (LAS to Multipoint)	55
Figura 4.8. Sufijo de los archivos de entrada (LAS to Multipoint).....	55
Figura 4.9. Selección del factor de conversión vertical (LAS to Multipoint)	55
Figura 4.10. Visualización de entidades de multipunto	56
Figura 4.11. Herramienta Multipart To Singlepart.....	56
Figura 4.12. Visualización de la entidad de puntos de elevación.....	57
Figura 4.13. Visualización en 3D de con ArcScene.....	57
Figura 4.14. Herramienta Add XY Coordinates.....	58
Figura 4.15. Resultados del script ExplodeLASMultipoint	59
Figura 4.16. Acceso al Editor de Visual Basic	59
Figura 4.17. Script IntensityBlobToZ en el editor de Visual Basic	60
Figura 4.18. Ventana del nombre de la entidad de salida.....	60
Figura 4.19. Modelo de creación de una Personal Geodatabase	61
Figura 4.20. Modelo de creación de una File Geodatabase.....	62
Figura 4.21. Modelo de carga de datos LiDAR	62
Figura 4.22. Script ExplodeLASMultipoint en el editor de Visual Basic	63
Figura 4.23. Modo de personalización en ArcMap	64
Figura 4.24. Creación de un nuevo botón en ArcMap	64
Figura 4.25. Opciones de configuración de botones	65
Figura 4.26. Código fuente del botón ExplodeLASMultipoint en el editor de Visual Basic	65
Figura 5.1. Esquema del proceso de normalización	69
Figura 5.2. Herramienta de selección por atributos.....	70
Figura 5.3. Herramienta de interpolación (IDW)	70
Figura 5.4. Herramienta Extract Values to Points.....	71
Figura 5.5. Herramienta para añadir un nuevo campo	71
Figura 5.6. Herramienta para calcular los atributos del nuevo campo	72
Figura 5.7. Tabla con los datos de elevación normalizados	72
Figura 5.8. Modelo de normalización de datos LiDAR	73
Figura 5.9. Distribución de parcelas aleatorias en un área de estudio.....	74
Figura 5.10. Mapa de estimación de biomasa de un área forestal.....	75

Figura 5.11. Mapa de estimaciones de error.....	76
Figura 5.12. Herramienta Summary Statistics.....	77
Figura 5.13. Medición de variables dependientes	78
Figura 5.14. Modelo de estimación de biomasa aplicado a las parcelas	79
Figura 5.15. Herramientas Create Fishnet.....	80
Figura 5.16. Herramienta Intersect.....	80
Figura 5.17. Modelo de estimación de biomasa aplicado al área de estudio.....	81
Figura 5.18. Zona de estudio y detalle del MTN25.....	82
Figura 5.19. Modelo de creación del espacio de trabajo	82
Figura 5.20. Combinación del modelo de carga de datos con el script ExplodeLASMultipoint	83
Figura 5.21. Muestra de la tabla de la entidad de multipuntos.....	83
Figura 5.22. Muestra de la tabla de la entidad de puntos	83
Figura 5.23. Modelo de normalización	83
Figura 5.24. MDT de los puntos clasificados como suelo	84
Figura 5.25. Muestra de la tabla con los valores de elevación normalizados	84
Figura 5.26. Modelo de análisis forestal aplicado a las parcelas.....	84
Figura 5.27. Muestra de la distribución de las parcelas del área de estudio.....	85
Figura 5.28. Modelo de análisis forestal aplicado al área de estudio.....	85
Figura 5.29. Gráficos de regresión de los modelos de predicción.....	86
Figura 5.30. Tabla con los datos de volumen forestal y de estimación de biomasa.....	87
Figura 5.31. Volumen forestal en la zona de estudio	87
Figura 5.32. Estimación de biomasa en la zona de estudio	88

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Clasificación de los datos LiDAR	19
Tabla 2.2. Comparación entre formatos	26
Tabla 2.3. Fases y errores del proceso de control de calidad	27
Tabla 2.4. Especificaciones de precisión según el tipo de terreno	28
Tabla 5.1. Variables estadísticas calculadas a partir del atributo de altura	79
Tabla 5.2. Comparación de resultados de estimación y error	79

PARTE I

Introducción a la Investigación

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta una breve descripción del contenido del trabajo, centrándose en su planteamiento inicial, sus objetivos, la metodología empleada y la organización establecida.

1.1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El planteamiento inicial de este trabajo se centra en la necesidad de procesar los datos LiDAR directamente con el software ArcGIS Desktop 10. El tratamiento de datos LiDAR con este software concreto suscita un problema fundamental: la visibilidad de los campos de información. Debido a su codificación binaria, ArcGIS es incapaz de mostrar todos los campos con la información inicial de los archivos .las. Esta información es esencial para su posterior tratamiento y la elaboración de productos derivados de los datos LiDAR.

La necesidad del Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible es intentar simplificar los procesos de tratamiento de datos LiDAR y facilitar el acceso a su información usando un único software. Esto permitiría a los operadores centrarse en los análisis forestales, evitando el manejo de diferentes manuales y tipos de software para extraer la información necesaria.

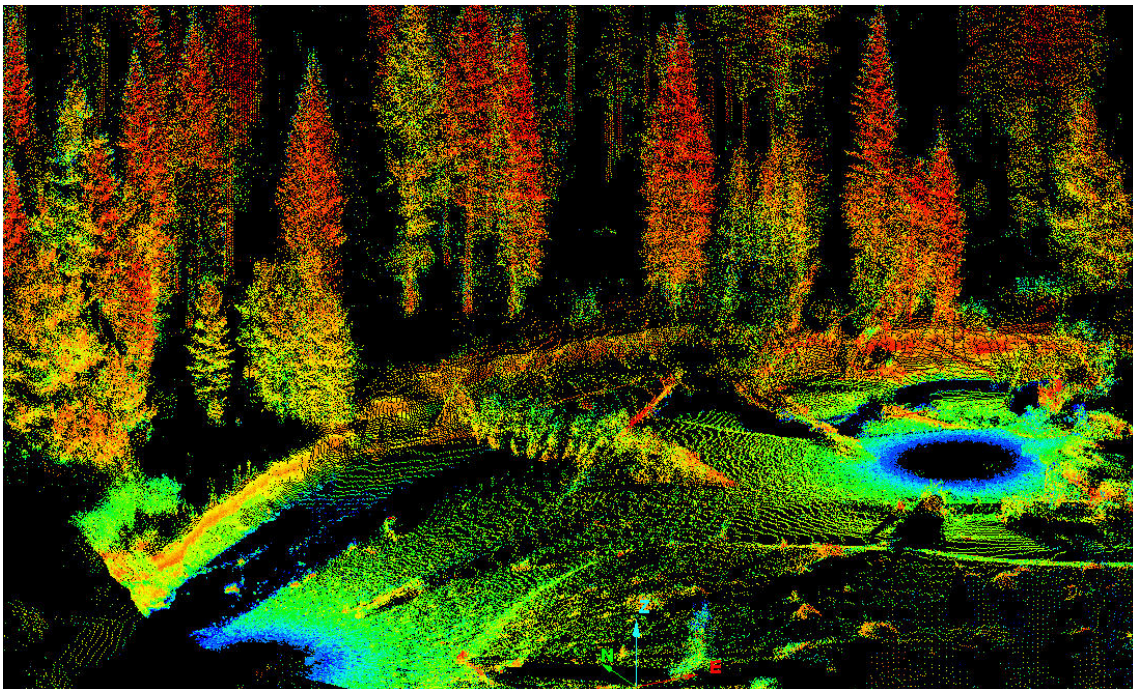


Figura 1.1. Muestra de datos LiDAR terrestres.

1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo se centran en el uso de ArcGIS 10 para transformar los datos LiDAR en archivos shapefile, mostrando todos los campos de información y permitiendo su uso sin restricciones.

Partiendo de datos proporcionados por el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible, el desarrollo del trabajo se centra en transformar estos datos en shapefile y desarrollar modelos de procesado y de normalización para estandarizar y simplificar estas operaciones.

Hay que tener en cuenta la enorme difusión que tiene el uso del software ArcGIS entre los profesionales dedicados a estudios y aplicaciones forestales. Así mismo, estos usuarios forestales se encuentran con numerosas dificultades a la hora de realizar estos estudios. Esto se debe a que gran parte de los programas de tratamiento de datos LiDAR son poco amigables y presentan una escasa interfaz gráfica.

Una vez superado este punto, se plantea a continuación la necesidad de desarrollar un modelo de geoprociamiento orientado a las aplicaciones forestales del Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible.

Este método se desarrolla para estimar variables de interés forestal como la biomasa, el volumen maderable u otras en un área concreta, a partir de la comparación de los datos LiDAR con los datos obtenidos en las mediciones y trabajos de campo.

1.3. METODOLOGÍA SEGUIDA DURANTE LA INVESTIGACIÓN

Los diferentes pasos seguidos durante el proceso de esta investigación se pueden resumir en los siguientes:

- Estudio inicial de los datos LiDAR y su información.
- Estudio inicial y aproximación a los diferentes programas y aplicaciones para el tratamiento de los datos.
- Acceso a la información desde ArcGIS 10.
- Análisis de la conversión de archivos .las a shapefile, conservando los atributos de posición y elevación.
- Creación de modelos para procesar y normalizar los datos LiDAR con ArcGIS 10.
- Creación de un modelo de geoprocesamiento forestal de los datos LiDAR con ArcGIS 10.

1.4. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Se comienza con la explicación del actual estado del arte relativo al tratamiento de datos LiDAR. Para ello se ha realizado una breve introducción del nacimiento y la evolución del sensor LiDAR, sus aplicaciones iniciales, así como los archivos generados, sus diversas versiones y los campos de información contenidos.

A continuación se mostrará una breve aproximación a los diferentes tipos de software que permiten el tratamiento de los datos LiDAR y cuáles son, a priori, sus puntos fuertes y sus debilidades.

Una vez mostrado el actual panorama relacionado con el tratamiento de la información LiDAR, pasará al desarrollo de la investigación:

- El primer punto trata el acceso a la información LiDAR desde ArcGIS, la diferencia entre los campos que contiene y los que muestra y el problema de la altura como campo fundamental para su posterior tratamiento.
- El segundo punto presenta el proceso seguido para pasar de .las a shapefile, desarrollando dos modelos: uno de procesamiento inicial de los archivos .las en ArcGIS y otro de normalización de los datos LiDAR para su tratamiento en aplicaciones forestales.
- El tercer y último punto del desarrollo de la investigación se centra en la elaboración de un modelo de geoprocésamiento forestal orientado a obtener una aproximación inicial de la biomasa forestal de un área concreta de estudio.

Finalmente se presentarán las conclusiones obtenidas de este trabajo: la evaluación de los objetivos y del modelo propuesto, las aportaciones originales, los trabajos derivados y las posibles líneas de investigación futuras.

PARTE II
Estado del Arte

Capítulo 2

Desarrollo y evolución de los datos LiDAR

Este capítulo recoge una breve introducción histórica del nacimiento y la evolución del sensor LiDAR, así como una descripción de los archivos .las, sus diferentes versiones y los campos de información que incluyen. Finalmente incluye una descripción de sus aplicaciones presentes y futuras.

2.1. HISTORIA DEL SENSOR LIDAR

2.1.1. Introducción

Los estudios y ensayos relativos al desarrollo y la implementación de los sistemas láser para aplicaciones relacionadas con la altimetría se iniciaron en la década de los años 60. A partir de los años 80, esta tecnología se empezó a aplicar a estudios atmosféricos, análisis volumétricos y análisis de composición de los materiales. Sin embargo, hasta finales de los años 90 esta tecnología no se aplicó a la fotogrametría y la teledetección, así como a proyectos de desarrollo de bases de datos geospaciales. Estos proyectos se centraban en el uso de información altimétrica para apoyar proyectos fotogramétricos, como por ejemplo, la producción de ortofotos y ortoimágenes o la generación de curvas de nivel, ambos apoyados en Modelos Digitales del Terreno.

Los Modelos Digitales del Terreno (o MDT's) son, a grandes rasgos, representaciones simplificadas de la topografía del terreno. Las elevaciones forman una superficie tridimensional ondulada, en la que dos dimensiones se refieren a los ejes de un espacio octogonal plano (X, Y), y la tercera mide la altura (Z).

El uso de los sistemas LiDAR se debe principalmente al incremento de la disponibilidad de datos, debido a su vez a la reducción del precio de los sensores aerotransportados. Esto, combinado con la disposición cada vez mayor de información GPS, permite la captura de una elevada densidad de datos de alta precisión. Esta precisión oscila entre 1 y 3 centímetros.

La mayor parte de los primeros sensores LiDAR fueron desarrollados de forma personalizada. Actualmente, la disponibilidad de sensores comerciales y el número de empresas que ofrecen servicios de captura de datos se ha incrementado de forma paralela.

Para las aplicaciones fotogramétricas y de teledetección, el sensor LiDAR se localiza aerotransportado. Este sistema aerotransportado puede ser muy diferente según las necesidades de los datos: ultraligeros, helicópteros, aviones,... Sin embargo, los aviones son más efectivos, ya que permiten una captura de datos más rápida y en un área más extensa.

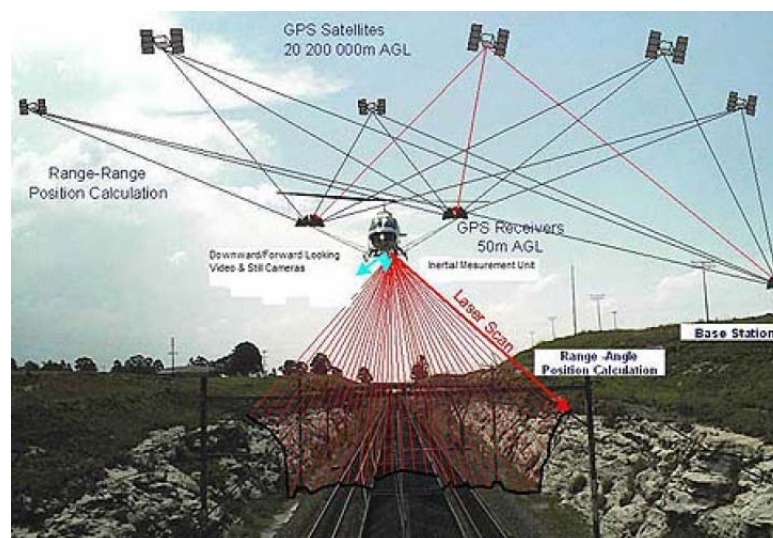


Figura 2.1. Esquema de la captura de datos LiDAR desde un helicóptero.

2.1.2. Definición

LiDAR significa *Light Detection And Ranging*, literalmente alcance y detección de la luz. Se trata de un sensor activo, ya que él mismo genera la energía (el pulso láser) que permite hacer los cálculos y las medidas. Esto permite usar el sensor de noche para evitar el tráfico aéreo. Sin embargo, a diferencia del RADAR, el sensor LiDAR no atraviesa nubes, lluvia o niebla. Esto permite su uso en aplicaciones de datos LiDAR para estudios atmosféricos y climatológicos. Del mismo modo es posible usar el sensor LiDAR para captura de datos batimétricos, aunque es necesario un pulso láser diferente (la banda verde con el infrarrojo).

El sensor LiDAR utiliza el mismo principio que el RADAR, solo que en lugar de usar ondas de radio utiliza pulsos de luz. El láser LiDAR envía una señal a la superficie terrestre desde un sensor aerotransportado; algunas de estas señales regresan de vuelta al transporte aéreo; el tiempo que tarda el rayo láser en llegar hasta la superficie terrestre y regresar al transporte aéreo se emplea para determinar la distancia hasta los elementos de la superficie. También es posible determinar el ángulo de salida del láser y la localización y la altura del transporte aéreo. De este modo es posible calcular de forma muy precisa la altura de los árboles, los edificios y cualquier elemento sobre el terreno.

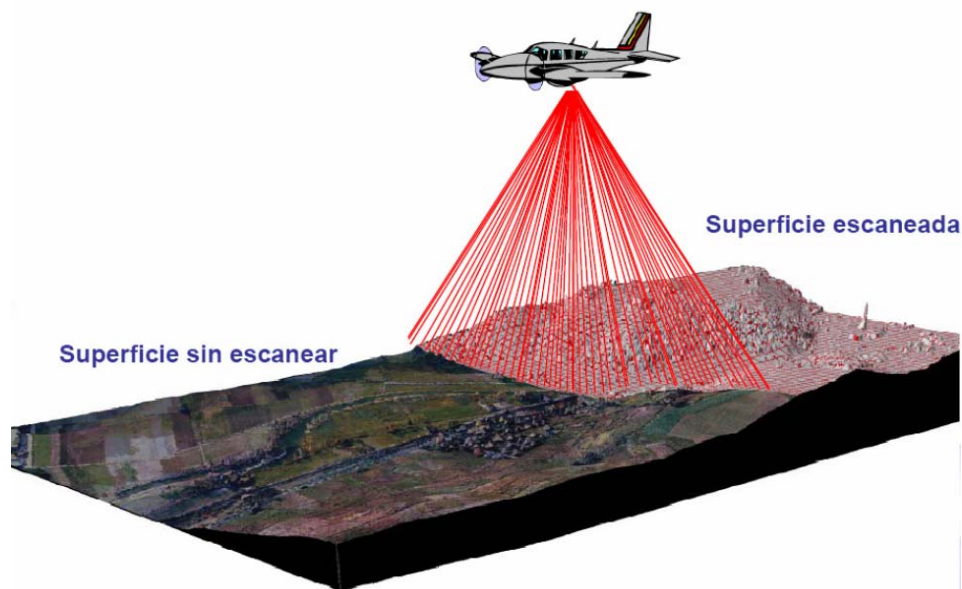


Figura 2.2. Esquema de la captura de datos LiDAR desde un avión.

Sus ventajas frente a otros procesos de captura de datos de elevación son: la precisión de centímetros, la mayor resolución y la obtención de datos con estas características bajo la cubierta vegetal.

La precisión de los datos se debe a la capacidad del sensor para emitir pulsos de luz. El resultado es una densa red de puntos de elevación georreferenciados de elevada precisión, denominada “nube de puntos”. Esta nube de puntos se puede usar para generar modelos tridimensionales de la superficie terrestre y sus objetos.

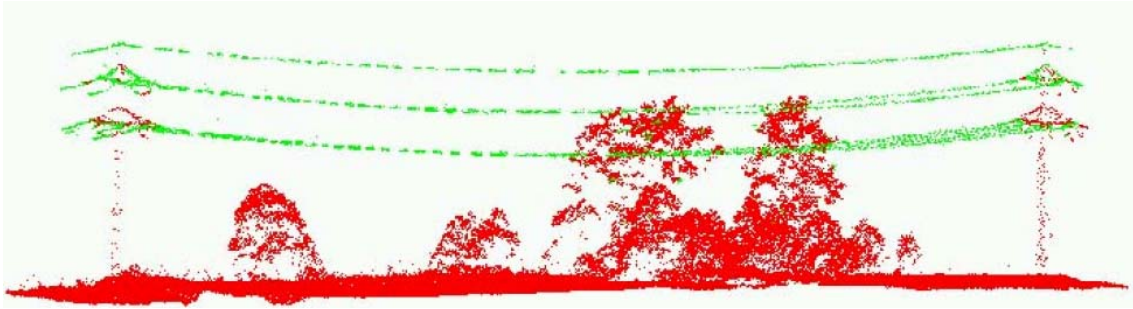


Figura 2.3. Vista transversal de la nube de puntos: en rojo vegetación y suelo desnudo, en verde líneas de alta tensión.

En cuanto a la habilidad del sensor LiDAR para capturar información bajo la cubierta vegetal, es una de sus principales ventajas, ya que el resto de sensores utilizados en teledetección son incapaces de resolver este problema.

Gracias a la elevada densidad de la nube de puntos generada por el sensor, incluso si un pequeño porcentaje de puntos alcanza el suelo, es suficiente para crear un Modelo Digital del Terreno con bastante precisión. En casos concretos, como la selva tropical, es posible crear Modelos Digitales del Terreno más precisos que las ortofotos o las ortoimágenes.

Por esta razón es recomendable realizar un estudio de los datos que se necesitan, ya que en determinadas ocasiones será necesario planear el vuelo LiDAR en determinadas fechas del año.



Figura 2.4. Esquema de retorno de pulsos láser.

2.2. ADQUISICIÓN DE DATOS LIDAR

2.2.1. Introducción

El proceso de adquisición de datos LiDAR es similar al usado en fotografía aérea. Es necesario realizar un estudio de planeamiento previo antes de iniciar el proceso de obtención de datos. Al igual que en la fotografía aérea, una comprensión detallada de las necesidades, los usos y las aplicaciones de los datos permite establecer los parámetros del vuelo.

2.2.2. Pasos para la adquisición de datos LiDAR

Estos son los pasos seguidos en el proceso de adquisición de los datos LiDAR:

- Planeamiento de vuelo: las claves son la precisión y el área de cobertura. Para ello hay que determinar la altura de vuelo, la velocidad del avión, el porcentaje de solape, las pasadas adicionales para asegurar la precisión y el ancho de cada pasada. La densidad de puntos (puntos por metro cuadrado) es fundamental, ya que depende del sensor y está relacionada con la precisión de los modelos. Por otra parte, hay que tener en cuenta los siguientes contratiempos que pueden ocasionar problemas en la ejecución del vuelo: cobertura nubosa, cuestiones de seguridad, condiciones del mar en zonas de costa, hora del día, condiciones climáticas.
- Ejecución del vuelo: conlleva la movilización de los recursos materiales (sensor y avión) y humanos (piloto, operador y personal de campo). En función de las necesidades, se pueden apoyar en trabajo de campo y estaciones GPS fijas para asegurar la precisión (GPS diferencial).
- Instalación de instrumentos y calibración de sistemas: es necesario comprobar la precisión y el buen funcionamiento del sensor LiDAR, así como su funcionamiento en vuelo.



Figura 2.5. Sensor LiDAR montado en la panza de un avión.

- Misión de vuelo: cada pasada del avión se considera una misión, que conlleva el ajuste de los sensores LiDAR y AGPS.

- Verificación de campo: para comprobar la precisión, es recomendable capturar datos de campo sobre una o varias pasadas del avión mediante GPS; esto permite contrastar los resultados.
- Post-proceso: con la información del GPS diferencial y los datos inerciales del avión.

2.2.3. Pre-procesado, filtrado y clasificación de los datos brutos

El proceso de captura consiste básicamente en la sincronización (en formato binario) de los datos con la información de navegación (x, y, z). Por esta razón es necesario procesar los datos que permitan generar productos de gran precisión.

El proceso de trabajo es el siguiente:

- Procesamiento de los datos GPS/INS, asegurando la cobertura completa, sin huecos, y la calidad de los datos.
- Eliminación de solapes: para evitar la duplicación de información y conseguir una densidad de puntos por metro cuadrado más homogénea.
- Depuración de la nube de puntos, clasificación y filtrado de las respuestas láser. En este punto se extrae la vegetación y todos los objetos sobre la superficie. Una vez extraídos, se calcula la altura de los puntos que quedan en esas zonas vacías mediante interpolación.

2.2.4. Generación de modelos digitales

Una vez que se ha obtenido una nube de puntos clasificada, se pueden generar productos derivados tales como los MDT's. Se puede mejorar la precisión de estos modelos incluyendo líneas de ruptura, al igual que en los procesos de fotogrametría. La detección de estas líneas de ruptura supone un reto importante para la generación automática de cartografía y es un interesante campo de investigación para la realización de cartografía en zonas urbanas.

Las líneas de ruptura son entidades lineales con valores de elevación asociados a cada vértice. Estas líneas delimitan cambios fuertes de pendiente en el terreno: cauces, vías de comunicación, infraestructuras lineales...El uso de estas líneas de ruptura es un valor añadido para asegurar la calidad de los datos.

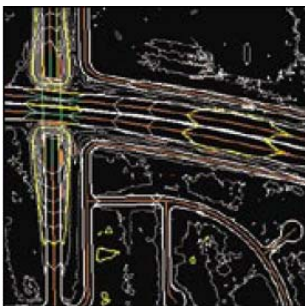


Figura 2.6. Líneas de ruptura en una zona urbana.

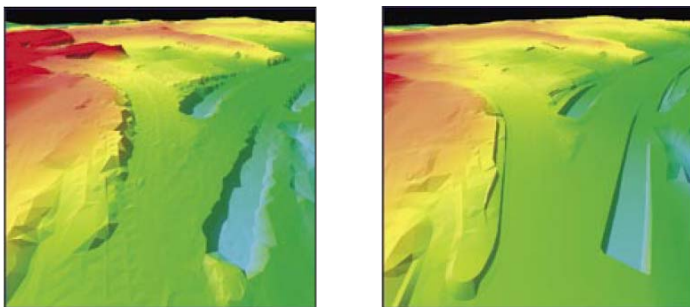


Figura 2.7. Diferencias entre un MDT sin líneas (izquierda) de ruptura y con ellas (derecha).

2.3. ATRIBUTOS DE LOS DATOS LIDAR

2.3.1. Introducción

Los datos de la nube de puntos incluyen información adicional, parte de la cual puede haberse generado durante la fase de pre-procesado (como por ejemplo la clasificación).

El uso de los atributos de los datos LiDAR requiere una comprensión de para qué sirven y dónde y cómo se encuentran almacenados. En ocasiones, los archivos .las incluyen una sección de cabecera, la cual recoge toda la información relacionada con los atributos y con los datos del archivo .las en conjunto (sistema de coordenadas, extensión, tamaño físico...). Sin embargo, en muchos casos esta sección de cabecera no existe.

Los datos del archivo .las están almacenados en formato binario, lo cual no es legible por parte de la mayoría de los editores de texto.

2.3.2. Clasificaciones

La clasificación de los datos LiDAR se lleva a cabo para almacenar cada punto en el grupo o clase que corresponda. Determinados programas producen un conjunto de puntos que representen solo los retornos que han rebotado en el suelo desnudo, almacenando el resto de puntos como un conjunto “sin clasificar”. Otros programas, que han desarrollado mejores algoritmos, son capaces de clasificar todos los puntos según grupos establecidos (vegetación alta, media y baja, edificios...).

Cuando se crea el MDT es posible eliminar todos los puntos sobrantes y realizar una representación lo más fidedigna posible de la superficie terrestre. Este ejemplo para crear un MDT es el caso más simple de clasificación; sin embargo, la clasificación de entidades concretas requiere más tiempo para fijar el rango de retornos necesario. Por ejemplo, cada vez son más las aplicaciones orientadas a diferenciar entre estructuras artificiales y vegetación, y dentro de esta, entre vegetación arbórea y arbustiva. A partir de estas clasificaciones es posible realizar MDT's orientados a representar infraestructuras urbanas o modelos de vegetación. Es en el ámbito de este tipo de aplicaciones forestales donde mayor desarrollo existe, por ejemplo, para determinar las alturas medias y máximas o para calcular la biomasa de un área.

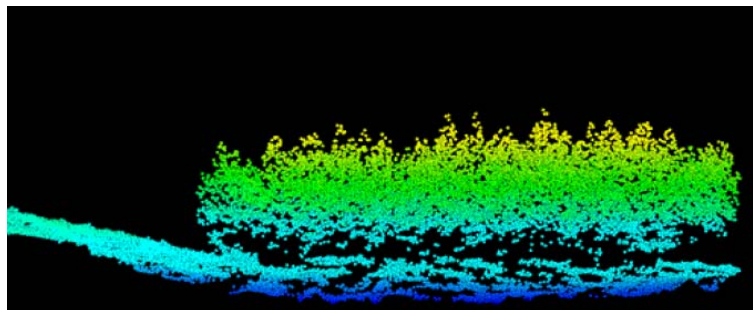


Figura 2.8. Vista transversal de datos LiDAR en 3D.

Los datos LiDAR pueden contener una o varias clasificaciones. Sin embargo, los datos en bruto se agrupan en una sola clase que recoge todas las respuestas de cada disparo láser. Las clasificaciones se crean durante el proceso de filtrado de datos; consiste en agrupar un conjunto de puntos que representen unas respuestas láser concretas.

Generalmente hay un mínimo de dos clasificaciones: suelo y cubierta vegetal, aunque también se incluyen los puntos de ruptura, los edificios, las líneas del tendido eléctrico... Los puntos restantes se agrupan formando un grupo sin clasificar (pueden ser pájaros u otros objetos en suspensión).

De este modo, a la hora de crear un MDT, es posible eliminar esos puntos y crear una representación lo más fidedigna posible de la superficie terrestre.

Los valores más importantes son el suelo, el agua y los datos sin clasificar. El agua es muy importante en zonas de costa, ya que se trata de una superficie que se puede confundir con el suelo en procesos automatizados. La clasificación más completa es la establecida por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Percepción Remota/Teledetección (ASPRS), que publicó la última versión en Octubre de 2010:

VALOR	DESCRIPCIÓN
0	Creados, nunca clasificados
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificios
7	Puntos bajos (ruido)
8	Nube de puntos
9	Agua
10	Reservado para ASPRS
11	Reservado para ASPRS
12	Puntos solapados
13-31	Reservado para ASPRS

Tabla 2.1. Clasificación de los datos LiDAR.

El uso de las clasificaciones está en crecimiento para incluir diferenciaciones entre vegetación y estructuras artificiales, así como entre alturas de vegetación y diferencias entre estructuras.

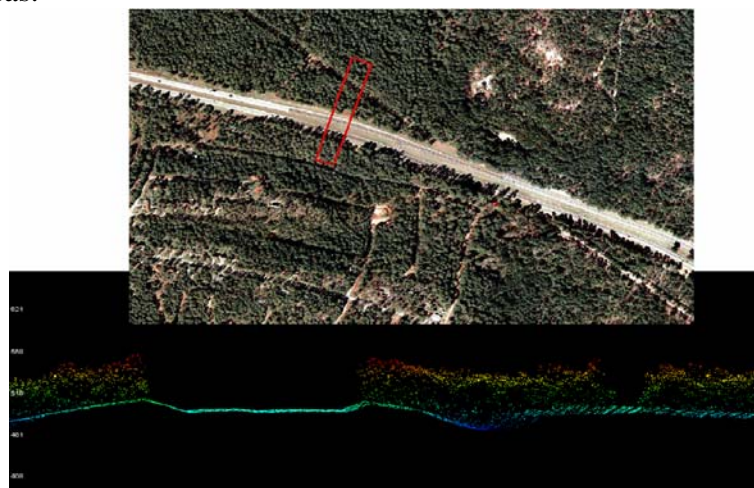


Figura 2.9. Transecto realizado con datos LiDAR.

2.3.3. Número de retornos

La capacidad de diferenciar múltiples retornos de los pulsos láser es la principal ventaja de la tecnología LiDAR. Anteriormente estos sistemas solo daban información acerca del primer y el último retorno. El número de retornos y su orden proporciona importante información para posteriores clasificaciones.

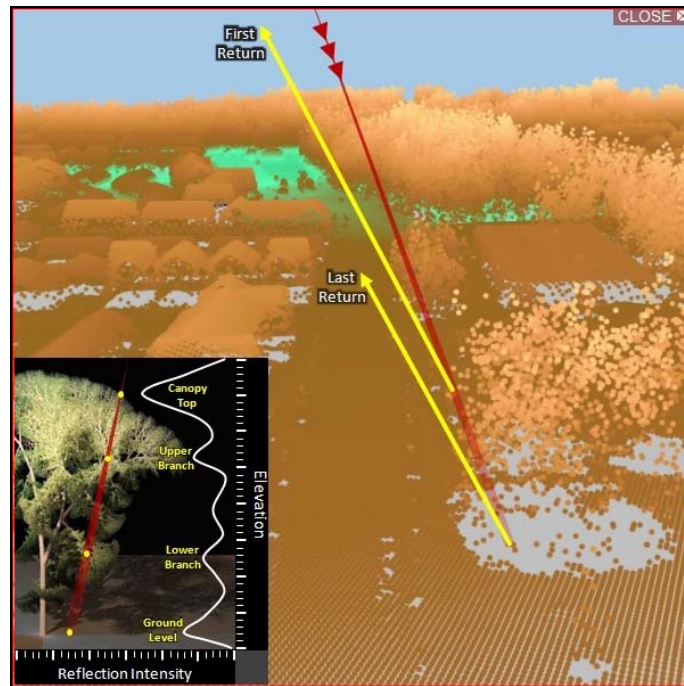


Figura 2.10. Esquema de retornos de los pulsos láser.

2.4. FORMATOS

Los formatos de almacenamiento de los datos LiDAR más comunes son los siguientes:

- **.Jas:** se trata de un formato estándar aceptado por las grandes empresas para almacenar todos los atributos LiDAR. La mayor parte de los fabricantes de sensores LiDAR han aceptado este formato. Almacena los atributos en formato binario, incluyendo tiempo GPS, datos de orientación inercial, x, y, z. La ventaja de este formato es que todos los atributos finales clasificados se almacenan en una tabla de bases de datos, lo que permite a los usuarios manejar un único archivo que permite generar gran variedad de productos y realizar multitud de análisis.
- **TIN:** se trata de un conjunto de triángulos creados para conectar los puntos en un MDT. Estos triángulos se rigen por unas reglas básicas: no tienen solapes, se basan en líneas de ruptura para marcar entidades lineales concretas...Se pueden generar y exportar automáticamente por parte de la mayoría de los programas de procesamiento LiDAR (ESRI, Intergraph, Autodesk...).
- **Grids:** son conjuntos de celdas equidistantes que tienen un atributo de elevación asociado al centro de cada celda. La resolución del tamaño de la celda depende de la aplicación o de la precisión requerida. Los datos LiDAR se juntan con la malla para suavizar los datos, sin embargo, no hay que generalizar la calidad o la precisión de los datos originales.
- **ASCII:** por lo general, este formato almacena un único identificador de cada punto con los campos x, y, z. Hasta el momento este formato acarrea muchos problemas debido a la incapacidad de almacenar el resto de atributos. Existen soluciones como crear múltiples archivos ASCII con cada una de las clasificaciones.
- **Shapefile:** es el formato por excelencia de ESRI, rápido y fácil de editar, permite almacenar los campos de información de los datos LiDAR. Sin embargo, en el caso de que no se haya generado directamente, hay problemas para transformar los archivos .las en shapefiles, debido a su codificación binaria.
- **Curvas de nivel:** se pueden interpolar a partir de los campos de elevación de los datos LiDAR y apoyándose en las líneas de ruptura. Son muy precisos debido a la elevada densidad de puntos, lo que provoca un aspecto visual más abrupto de lo que estamos acostumbrados.
- **Bases de datos SIG diseñadas para datos LiDAR:** estos modelos de bases de datos desarrollados por algunas empresas permiten almacenar todos los atributos LiDAR.
- **Diseño de geodatabases personales:** las estructuras de estas bases de datos son genéricas y permiten flexibilidad a la hora de almacenar y exportar datos LiDAR en otros diseños de bases de datos.

Los archivos .las contienen los datos registrados de los puntos LiDAR. Los datos se almacenan en este formato que combina la información de posicionamiento (GPS), los datos inerciales del avión (INS/IMU) y el rango de datos de los pulsos láser que permite obtener los datos x, y, z de cada punto. El objetivo del uso de este formato de datos es proporcionar un formato abierto que permita manejar los datos LiDAR en cualquier equipo y con programas específicos.

2.4.1. Definición del formato .las

El formato .las contiene datos binarios que consisten en archivo cabecera, registros de longitud variable y datos de puntos. Algunos archivos .las contienen datos de la forma de la onda.

Todos los datos están en formato *little-endian*. El archivo cabecera contiene los datos genéricos como el número de puntos y el área de cobertura seguidos de los registros de amplitud variable. Estos últimos contienen diferentes datos como la proyección, los metadatos, la forma de la onda o las aplicaciones.

2.4.2. Tipos de datos

```

Statistics
-----
Horizontal Mean:      2.81
Biased Horizontal Mean: 2.75
Biased Point Density : 3.31
Source ID Count :    4
LAS Header
-----
GUID:                 00000000-0000-0000-0000-000000000000
LAS Version:          1.0
System ID:             <empty>
Generating Software:   TerraScan
Flight Date Julian:    0
Year:                  0

Header Size:          227
Point Data Offset:    709
VLR Count:             5

Point Data Format:     Format 1
Point Data Record Length: 28
Number of Point Records: 3133353
Points By Return
  Return 1: 2435079
  Return 2: 582099
  Return 3: 109295
  Return 4: 6880
  Return 5: 0

X,Y,Z Scale Factors:  0.0100, 0.0100, 0.0010
X,Y,Z Offsets:        0.00, 0.00, 0.00
Min, Max X:           2259257.54, 2264183.12
Min, Max Y:           351365.95, 356291.85
    
```

Figura 2.11. Ejemplo de un archivo cabecera.

2.4.3. Registros de datos de puntos

2.4.3.1. Formato 0

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bits 0, 1, 2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bits 3, 4, 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*

Figura 2.12. Atributos del formato 0.

Los valores x, y, z se almacenan como enteros largos. Se combinan con los valores de escala y de compensación (INS) para determinar las coordenadas de cada punto.

El valor de intensidad es un entero que representa la magnitud del retorno del pulso láser.

Los siguientes cuatro valores se almacenan como campos de byte:

- El retorno es el número de veces que regresan los pulsos. Un único pulso puede tener varios retornos, especificando el orden de retorno según vuelve la señal.
- El número de retornos es el número total de recursos de un pulso. Por ejemplo, los datos de un punto láser puede ser el segundo retorno con un número total de retornos de cinco.
- La dirección de escaneado indica la dirección en la que se mueve el espejo del escáner en el momento de disparar el pulso láser. Un valor de 1 es positivo (de izquierda a derecha) y un valor de 0 es negativo (de derecha a izquierda).
- La línea de vuelo tiene valor 1 cuando el punto está al final del escaneado. Es el último punto antes de que el avión cambie de dirección.

La clasificación representa los atributos de clase de un punto. Si un punto no se clasifica debe ser 0.

El ángulo de escaneado es un campo de un solo byte con un rango entre -90 y +90. Es el ángulo en el que el punto láser es disparado desde el avión. El valor 0 representa el nadir, mientras que el valor negativo indica el lado izquierdo del avión.

El identificador del punto indica el orden de captura de los puntos.

2.4.3.2. Formato 1

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bits 0, 1, 2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bits 3, 4, 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*
GPS Time	Double	8 bytes	*

Figura 2.13. Atributos del formato 1.

El tiempo GPS es de tipo doble flotante con la información de cada punto.

2.4.3.3. Formato 2

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bits 0, 1, 2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bits 3, 4, 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*
Red	unsigned short	2 bytes	*
Green	unsigned short	2 bytes	*
Blue	unsigned short	2 bytes	*

Figura 2.14. Atributos del formato 2.

Los campos denominados rojo, verde y azul almacenan el valor RGB asociado a cada punto. Deben normalizarse a 16 bits.

2.4.3.4. Formato 3

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bits 0, 1, 2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bits 3, 4, 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*

Figura 2.15. Atributos del formato 3.

2.4.3.5. Formato 4

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bits 0-2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bits 3-5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	unsigned char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*
GPS Time	double	8 bytes	*
Wave Packet Descriptor Index	Unsigned char	1 byte	*
Byte offset to waveform data	Unsigned long long	8 bytes	*
Waveform packet size in bytes	Unsigned long	4 bytes	*
Return Point Waveform Location	float	4 bytes	*
X(t)	float	4 bytes	*
Y(t)	float	4 bytes	*
Z(t)	float	4 bytes	*

Figura 2.16. Atributos del formato 4.

Este formato recoge los mismos atributos que el formato 1 añadiendo información de onda.

2.4.3.6. Formato 5

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bit 0 – 2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bit 3 – 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	unsigned char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*
GPS Time	double	8 bytes	*
Red	unsigned short	2 bytes	*
Green	unsigned short	2 bytes	*
Blue	unsigned short	2 bytes	*
Wave Packet Descriptor Index	Unsigned char	1 byte	*
Byte offset to waveform data	Unsigned long long	8 bytes	*
Waveform packet size in bytes	Unsigned long	4 bytes	*
Return Point Waveform Location	float	4 bytes	*
X(t)	float	4 bytes	*
Y(t)	float	4 bytes	*
Z(t)	float	4 bytes	*

Figura 2.17. Atributos del formato 5.

El formato 5 es un tipo de LiDAR peculiar que emplean los sistemas de onda completa. Estos registran la forma completa de la onda, es decir, almacena información de los máximos y los valores que se encuentran entre los máximos.

Este formato recoge los mismos atributos que el formato 4 añadiendo información de los valores RGB.

La descripción de onda indica el valor de onda, hasta 255.

Los datos de onda representa la localización del inicio de captura de puntos.

El tamaño de onda, en bytes, recoge el tamaño físico del registro.

La localización del punto de retorno recoge desde el primer valor capturado hasta el último pulso detectado.

2.4.3.7. Comparación entre formatos

ATRIBUTOS/FORMATO	0	1	2	3	4	5
X	X	X	X	X	X	X
Y	X	X	X	X	X	X
Z	X	X	X	X	X	X
INTENSIDAD	X	X	X	X	X	X
RETORNO	X	X	X	X	X	X
Nº DE RETORNOS	X	X	X	X	X	X
DIRECCIÓN DE ESCANEADO	X	X	X	X	X	X
LÍNEA DE VUELO	X	X	X	X	X	X
CLASIFICACIÓN	X	X	X	X	X	X
ÁNGULO DE ESCANEADO	X	X	X	X	X	X
USUARIO	X	X	X	X	X	X
IDENTIFICADOR	X	X	X	X	X	X
GPS	-	X	X	-	X	X
ROJO	-	-	X	-	-	X
VERDE	-	-	X	-	-	X
AZUL	-	-	X	-	-	X
DESCRIPCIÓN DE ONDA	-	-	-	-	X	X
DATOS DE ONDA	-	-	-	-	X	X
TAMAÑO DE ONDA	-	-	-	-	X	X
LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE RETORNO	-	-	-	-	X	X
X(t)	-	-	-	-	X	X
Y(t)	-	-	-	-	X	X
Z(t)	-	-	-	-	X	X

Tabla 2.2. Comparación entre formatos.

2.4.4. Información de georreferenciación

La georreferenciación del formato .las usa el mismo mecanismo que el desarrollado para el formato estándar GeoTIFF. Los registros de cabecera de longitud variable contienen los mismos datos que los registros clave de los archivos TIFF en un GeoTIFF. Partiendo de estas premisas, cualquier desarrollo de software orientado a la interpretación de archivos .las puede apoyarse en los mismos principios que la lectura de archivos GeoTIFF, excepto aquellos registros referidos a los datos raster.

2.5. PROCESOS DE CONTROL DE CALIDAD

Es importante entender cuáles son y dónde se producen los errores más comunes, ya que los datos LiDAR pueden estar sesgados y ser menos precisos. Esto es debido a que un proyecto LiDAR requiere la sincronización de diversas tecnologías. Una vez que se identifica el error es necesario aplicar un método para verificarlo y validar los datos.

Es importante conocer el flujo de trabajo de la captura y procesamiento de los datos LiDAR para saber en qué fase se producen errores y cómo solucionarlos antes de que se propaguen a las siguientes fases del trabajo. A continuación se incluye una lista con las principales fuentes de errores:

FASES	ERRORES
Planeamiento	Límites incorrectos del área de estudio
	Error en la elección del Datum
	Errores en la transformación de la proyección
	Distancia entre puntos incompatible con la precisión
	Cortes en la línea de vuelo
	Pasadas muy anchas o muy estrechas
	Velocidad del pulso láser inadecuada
	Campo de visión incorrecto para capturar datos a través de la cubierta vegetal
	Escasa superposición de pasadas
Trabajo de campo	Estaciones de referencia equivocadas
	Demasiada distancia a la estación GPS
	Falta de señales GPS
	Errores en el postproceso por falta de datos GPS
	Errores de medida de los operadores de campo
Captura de datos	Sistema de coordenadas equivocado
	Mal funcionamiento del láser
	Mal funcionamiento del sensor inercial
	Problemas con el AGPS
	Problemas de calibración de instrumentos
	Problemas eléctricos
	Errores del operador en vuelo
Post-proceso	Aplicación de medidas de campo erróneas
	Calibración incorrecta del centro de la línea de vuelo
	Líneas de ruptura no asociadas a los datos
	Errores del operador

Tabla 2.3. Fases y errores del proceso de control de calidad.

2.5.1. Métodos de validación

Después de cada vuelo es necesario validar los datos recién capturados para detectar los errores y corregirlos, evitando su difusión en siguientes procesos de captura. Los métodos de validación y las herramientas para corregir los errores varían en función del proyecto. El mejor apoyo son puntos de control sobre el terreno, pero su presencia o no depende de la zona de estudio. A continuación he recopilado algunos de los métodos más comunes de validación:

- Levantamiento en campo: datos que se recogen en campo para la validación (puntos de control individuales, líneas de ruptura sobre el terreno, levantamiento de áreas de muestra, levantamientos topográficos)

- Uso de bases de datos existentes: bases de datos de puntos de control y curvas de nivel existentes.

2.5.2. Especificaciones de precisión

Las especificaciones de precisión son una pieza clave de la información, que se encuentra en los metadatos. En ocasiones, los conjuntos de datos vienen acompañados de un informe que recoge los parámetros de captura de datos y la calidad de los mismos. El método más común para expresar esta precisión se basa en el error medio cuadrático (RMSE), análogo a la desviación estándar de un conjunto de datos no sesgado. Los valores de precisión se calculan usando los puntos de control sobre el terreno, Ground Control Points (GCP). Estos son puntos sobre la superficie terrestres de los que se conoce su localización, es decir, sus coordenadas, y se usan para georreferenciar datos espaciales; se han obtenido directamente del terreno y tienen valores muy precisos de posición y elevación. Una vez creado el TIN, este se compara con los puntos de control para interpolar valores de elevación. A continuación se muestra una tabla orientativa con los valores de error medio cuadrático y puntos de control sobre el terreno aproximados según el tipo de terreno (estos datos han sido estimados por la ASPRS para realizar un control de calidad óptimo):

TIPO DE TERRENO	Nº DE PUNTOS	ERROR MEDIO CUADRÁTICO	PRECISIÓN VERTICAL
Urbano	24	0,071	0,13
Forestal	35	0,116	0,26
Monte bajo	24	0,1	0,18
Cultivos	36	0,98	0,18
Terreno abierto	47	0,081	0,12
Total combinado	166	0,094	0,19

Tabla 2.4. Especificaciones de precisión según el tipo de terreno.

La premisa básica es que el suelo desnudo sea representado con la mayor precisión posible. La precisión en otro tipo de coberturas se relaciona con el éxito a la hora de eliminar la vegetación y las estructuras. La clase urbana es una prueba de la habilidad del sensor LiDAR para recibir datos de superficies artificiales, las cuáles pueden absorber los pulsos láser y podrían causar pérdida de datos.

El uso de los datos para aplicaciones específicas puede depender de la precisión de los datos en determinadas coberturas. Por ejemplo, la delimitación de la línea de costa requiere un gran nivel de precisión en la clase de suelo desnudo, mientras que para un análisis de inundaciones es necesario que tanto el suelo desnudo como las áreas forestales tengan precisiones adecuadas para crear superficies topográficas lo más próximas a la realidad. Por esta razón, un mismo conjunto de datos puede ser altamente preciso para un propósito pero inadecuado para otro.

Toda esta elevada precisión tiene un precio y debe especificarse en las necesidades del proyecto. Siempre será mejor cuanto más precisos sean los datos, y es probable que futuros usos de esos datos se beneficien de la elevada precisión.

2.5.3. Revisión cualitativa de los datos LiDAR

La revisión cualitativa de los datos LiDAR es más subjetiva que los requisitos de precisión. Los aseguramientos de precisión solo controlan entre 200 y 330 puntos del billón de puntos que pueden conformar el conjunto de datos; de este modo, la revisión cualitativa se puede definir como un control del otro billón de puntos restantes. No existen procedimientos para obtener la precisión cualitativa, por lo que es necesario familiarizarse con los datos LiDAR en general, así como la localización y el uso particular que se les va a dar.

Algunos de los errores cualitativos más comunes son los siguientes:

- Desajuste en la línea de vuelo.
- Ruido de alta frecuencia.
- Tipo de formato de los datos.
- Errores en la clasificación.
- Presencia de huecos y áreas vacías.

La mayoría de estos errores pueden solventarse con mayor o menor dificultad, aunque hay que tener en cuenta que no existe un conjunto de datos perfecto, ya que generalmente hay niveles en los que se obtiene información errónea.

2.5.4. Metadatos

Los metadatos permiten conocer los parámetros de captura de los datos, su precisión, su procesamiento, su control de calidad... Hay que tener en cuenta que cada conjunto de datos está asociado con un archivo de metadatos, por lo que si se subdivide en secciones o se une a otros conjuntos de datos pueden encontrarse diferencias en la metadatación.

2.6. UNA APROXIMACIÓN A LAS APLICACIONES LIDAR

Los datos LiDAR se usan para una amplia variedad de aplicaciones y procesos de análisis, entre los que destacan los siguientes:

- Mapas topográficos: a partir de datos LiDAR se pueden generar MDS con sus correspondientes curvas de nivel.
- Análisis en 3D: con los datos LiDAR se pueden generar modelos de elevación y de superficies superpuestas, viendo de este modo los objetos localizados sobre la superficie.
- Análisis de inundaciones: los datos de elevación tan detallados del sensor LiDAR permiten generar modelos de inundaciones.
- Análisis de vegetación: una de las principales ventajas de los datos LiDAR es la precisión para determinar la cobertura vegetal del terreno. Cada vez está más presente en los análisis forestales para determinar valores de biomasa y otras variables de interés forestal (por ejemplo el volumen forestal).

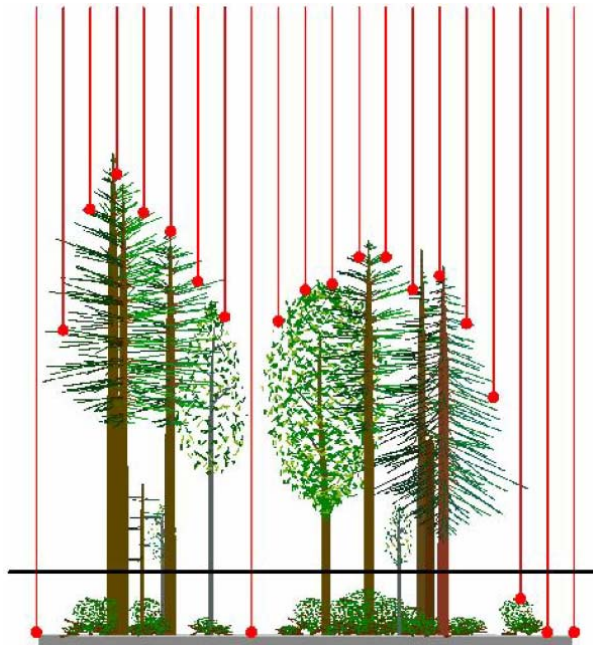


Figura 2.18. Esquema de la captura de datos LiDAR en zonas forestales.

- Análisis de costas: se centran en estudios medioambientales orientados a la erosión litoral, el transporte de sedimentos, los cambios en el nivel del mar y el control de la vegetación en los humedales.
- Análisis de redes: entre los que destaca la captura de datos de líneas de transmisión, como por ejemplo el mantenimiento de las vías de comunicación, líneas eléctricas, tuberías y canales o la planificación de todo tipo de antenas de transmisión de ondas que requieren datos precisos de elevación, cobertura y líneas de visión.
- Emergencias: los datos LiDAR son muy útiles a la hora de analizar accidentes, catástrofes o desastres naturales, ofreciendo datos rápidamente y con gran precisión.
- Análisis volumétricos: este tipo de análisis engloban todo tipo de estudios, desde el cálculo de grandes masas de materiales hasta el análisis de edificaciones y planificaciones arquitectónicas.

- Análisis urbanos: la captura de datos LiDAR tan precisos permiten generar modelos urbanos de gran calidad para realizar análisis de planificación urbanística.
- Análisis de deslizamientos de tierra: la precisión de los datos se usa para predecir corrimientos de tierra, así como para determinar sus efectos en caso de que causen daños.

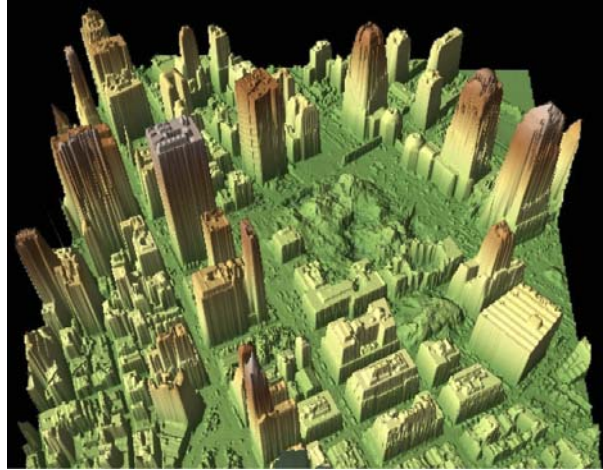


Figura 2.19. Ejemplo de datos LiDAR en zonas urbanas.

- Arqueología: la disposición de datos concretos y precisos permite realizar detallados estudios arqueológicos, incluso en zonas con densas cubiertas vegetales.

2.7. TENDENCIAS FUTURAS

A pesar de que el uso de los datos LiDAR es relativamente novedoso, su empleo está muy extendido, pero su potencial está por descubrir. En función de las necesidades comerciales y de los usuarios, cada vez se crean más herramientas específicamente desarrolladas para aplicaciones concretas. Las tendencias comerciales apuntan a una búsqueda de reducción de costes de los MDT en las aplicaciones topográficas para pasar a formar parte de los datos básicos de las principales Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE's).

La industria geoespacial también está experimentando un incremento del número de empresas que proveen servicios de captura de datos LiDAR. Gran parte de las grandes empresas de fotogrametría están incluyendo progresivamente la adquisición de datos LiDAR y, en algunos casos, sustituyendo la fotografía aérea, como en el caso del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, que ya incluye la adquisición de datos LiDAR. Inicialmente eran pequeñas empresas dedicadas exclusivamente a la captura de datos LiDAR, sin embargo actualmente las grandes empresas contratan estos servicios o los implementan entre sus capacidades.

2.7.1. Desarrollo tecnológico actual

El incremento de la velocidad de los pulsos láser permite aumentar la densidad de puntos de información o reducir el tiempo de captura gracias a que el avión puede volar a mayor altitud. El incremento de la densidad de puntos permite disponer de información cada 1 o 2 metros en la actualidad. Con esta densidad, el número de puntos incluidos en un conjunto de datos LiDAR puede provocar problemas de visualización, almacenamiento, procesamiento y análisis. Por esta razón, la mayor parte de los usuarios deciden subdividir el terreno en áreas más pequeñas y manejables a la hora de realizar estas operaciones. Una de las tendencias es el incremento de nuevas herramientas para asistir en la accesibilidad y la manipulación de los datos.

La extracción automática de entidades se centra actualmente en la identificación de entidades de área como polígonos de vegetación, límites de estructuras artificiales o líneas centrales de vías de comunicación y/o infraestructuras artificiales.

La fusión de imágenes permite superponer imágenes sobre nubes de puntos LiDAR, lo que permite desarrollar nuevos productos digitales, como nubes de puntos LiDAR en las que cada punto, además de la información de su posición espacial contiene la información sobre su color.

La creación de imágenes de intensidad se realiza a partir de la intensidad de cada pulso láser y permite generar productos muy similares a las ortoimágenes. El valor de la intensidad se puede almacenar en la nube de puntos o en un archivo ráster. La frecuencia de pulso del sensor combinado con el rango de intensidad en una imagen determina las características de su visualización.

La detección de cambios permite identificar áreas de cambio en los modelos de superficie y de elevación mediante de la comparación de conjuntos de datos con diferentes fechas de captura.

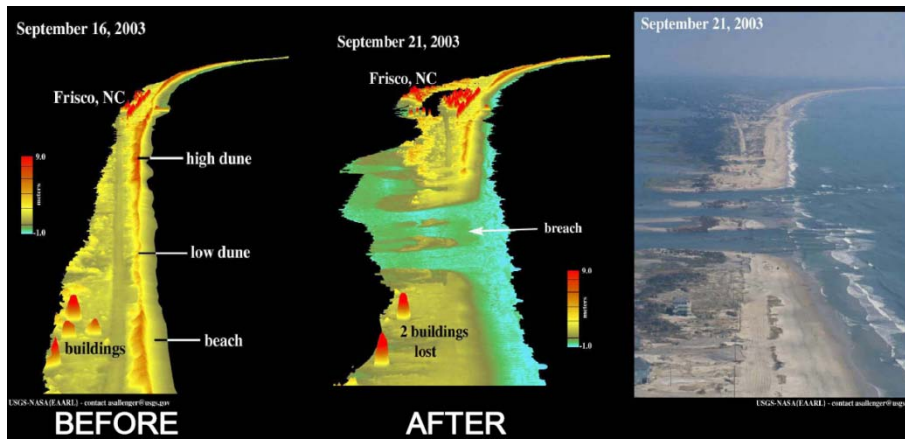


Figura 2.20. Datos temporales de muy alta resolución para realizar análisis de detección de cambios (USGS).

Además de la captura de datos LiDAR desde sensores aerotransportados, los sensores LiDAR se pueden situar sobre el terreno. Este sistema se configura de igual manera que los aerotransportados. Se trata de un escáner láser automático que permite modelizar objetos y estructuras complejas.



Figura 2.21. Estación LiDAR Leica.

En función de los sistemas, las coordenadas se pueden calcular automáticamente o en el post-proceso.

2.7.2. Desarrollo tecnológico futuro

- Sensores con mayor capacidad para permitir su captura desde el espacio, lo que aumentaría su velocidad de captura y su cobertura. En este caso destaca el actual desarrollo del ICESAT-GLAS: un sensor orientado a capturar datos de elevación de masas de hielo, coberturas nubosas y distribución de aerosoles.
- Mayor capacidad de captura de información para almacenar y analizar.
- Fusión de sensores LiDAR y sensores multispectrales y/o pancromáticos, para unir datos LiDAR con ortoimágenes y ortofotografías.
- Incremento de la velocidad en la transmisión de datos, lo que permitiría procesar y analizar los datos prácticamente en tiempo real.

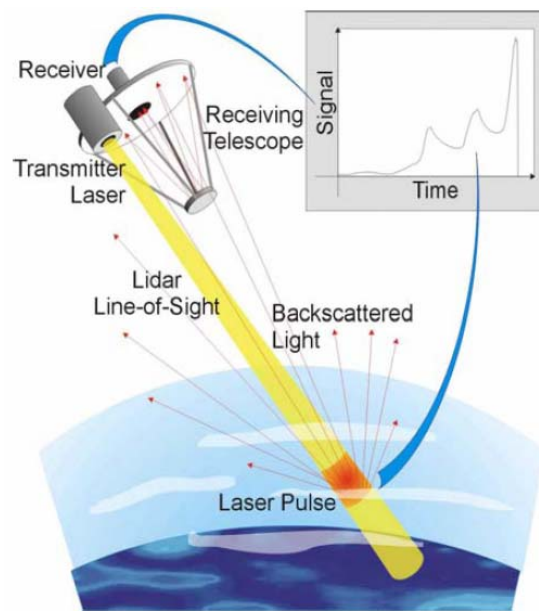


Figura 2.22. Esquema del uso de sensores LiDAR desde un satélite en órbita.

Capítulo 3

Aproximación al software existente para el tratamiento de datos LiDAR

Este capítulo recoge una aproximación al software existente para el tratamiento y la visualización de los datos LiDAR, así como una muestra de aplicaciones desarrolladas específicamente para determinados Sistemas de Información Geográfica. Se ha estudiado por separado el software comercial, gratuito y libre.

3.1. SOFTWARE COMERCIAL

El software comercial es aquel en el que el usuario tiene limitaciones de uso y de modificación. En este apartado voy mostrar algunos ejemplos de Sistemas de Información Geográfica y de software especializados en el tratamiento de datos espaciales.

En lo referente a los Sistemas de Información Geográfica se han realizado una serie de pruebas con copias de evaluación y licencias de estudiante de ArcGIS Desktop 10 y Global Mapper 11.

Ante las dificultades surgidas con ArcGIS 10 para tratar los archivos .las, surgió la necesidad de buscar complementos o extensiones para este software que permitan trabajar con datos LiDAR:

- La aplicación LP360 para tratamiento de archivos .las con ArcGIS 10.
- La extensión LiDAR Analyst.

En cuanto al software de tratamiento de datos espaciales se ha procedido a realizar algunas pruebas con copias de evaluación de FME (Feature Manipulation Engine).

Entre los programas y aplicaciones que permiten tratar y analizar datos LiDAR desde ArcGIS destacan los siguientes:

- LiDAR Explorer: una extensión para ArcGIS orientada al tratamiento de archivos .las como datos de puntos, tanto en ArcMap como en ArcScene; permite convertir los archivos .las en ASCII. Está comercializado por ProLogic.
- LiDAR Data Handler: una extensión para ArcGIS que permite manipular y usar datos LiDAR. Está desarrollada por Digital Coast, del servicio NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Se ha quedado obsoleta ya que solo es útil hasta versión 9.3 de ArcGIS, por lo que no es válido dentro de este trabajo orientado a la versión 10.

Para mostrar estos ejemplos se ha decidido utilizar una muestra de datos LiDAR muy concreta e identificable, realizada por la empresa Insica, la cual ofrece gratuitamente estos datos junto con un visor.

3.1.1. ArcGIS 10 y sus extensiones para el tratamiento de datos LiDAR

El programa ArcGIS 10 de ESRI no permite visualizar, tratar, manipular o analizar archivos .las directamente. Esto se debe a que almacena los atributos en formato binario y, como se mostraba en el capítulo anterior, para poder leer estos formatos es necesario editores específicos. Por esta razón, ArcGIS lee ciertos atributos de los archivos .las como grandes objetos binarios, de sus siglas en inglés BLOB. Se trata de un conjunto de datos binario almacenados como una única entidad en una base de datos que permite su compresión. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, con las clasificaciones de los pulsos láser.

Por esta razón, el tratamiento de datos LiDAR con el software de ESRI es el objeto central de este trabajo, que será abordado en la parte del desarrollo de la investigación.

A continuación se muestran los resultados de aplicaciones complementarias desarrolladas por empresas privadas para facilitar el tratamiento de datos LiDAR desde el entorno de ArcGIS.

3.1.1.1. LP360

La herramienta de la empresa QCoherent es una de las más potentes desarrollada actualmente para trabajar con datos LiDAR en el entorno de ArcGIS. Permite realizar numerosas acciones con archivos .las directamente en ArcMap:

- Importar archivos ASCII, XYZ y archivos shapefile de puntos.
- Muestra el número de puntos total del archivo .las y el porcentaje de estos que muestra en el visualizador de ArcMap.
- Permite exportar con diversas opciones:
 - Tipo: de punto o ráster de elevación.
 - Formato: ASCII XYZ, .las, shapefile de puntos, .dgn de Microstation y .dxf de AutoCAD.
 - Atributos: x, y, z, intensidad, clasificación, fuente, retorno, número de retornos, ángulo de escaneo, datos y fecha de captura.
 - Filtros: selección de las clases estandarizadas de la ASPRS.

La figura 3.1 muestra la aplicación para exportar archivos .las a otros formatos (izquierda) y su filtro por el atributo de clasificación, combinaciones de retornos y/o rangos de elevaciones (derecha):

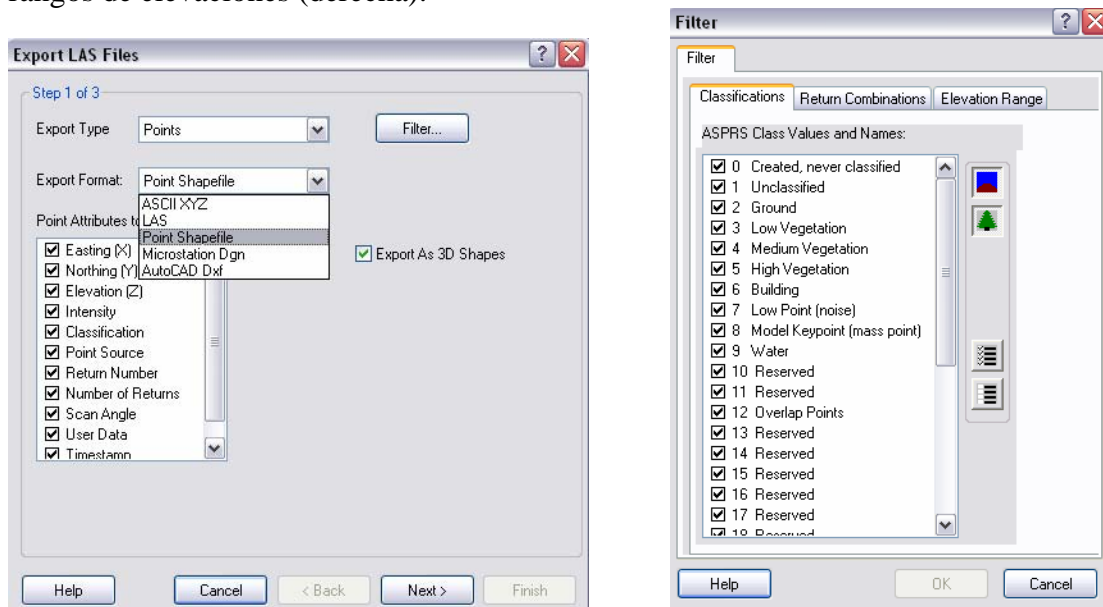


Figura 3.1. Exportación de archivos .las con LP360.

- Permite visualizar las propiedades del archivo .las: extensión, fuente, sistemas de coordenadas, simbología, clasificación, combinación de retornos, uso de líneas de ruptura, opciones de TIN...
- Genera automáticamente curvas de nivel, TIN, imagen de intensidad, extensión del conjunto de datos, combinaciones de retornos...
- Administrar los filtros que se pueden aplicar automáticamente y generar nuevos filtros personalizados.

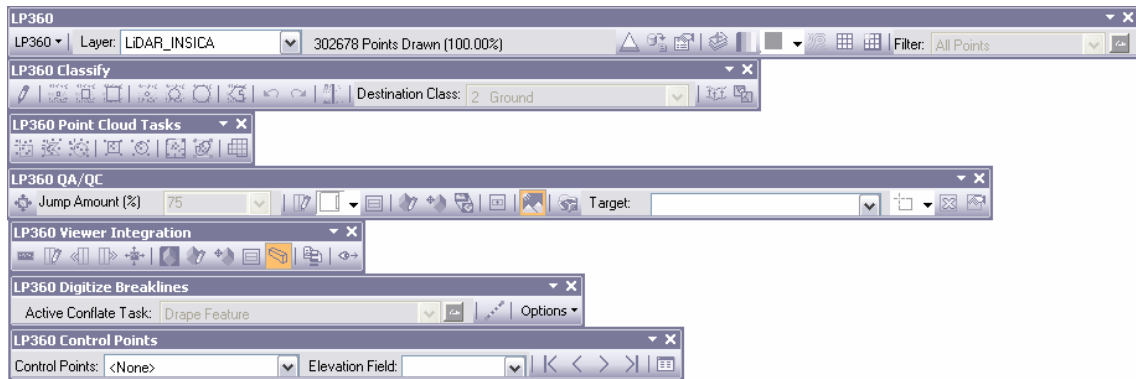


Figura 3.2. Barras de herramientas de LP360.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la visualización de archivos .las en 2D con la extensión LP360 para ArcGIS 10 (izquierda) y de shapefiles de puntos en 3D con ArcScene (derecha):

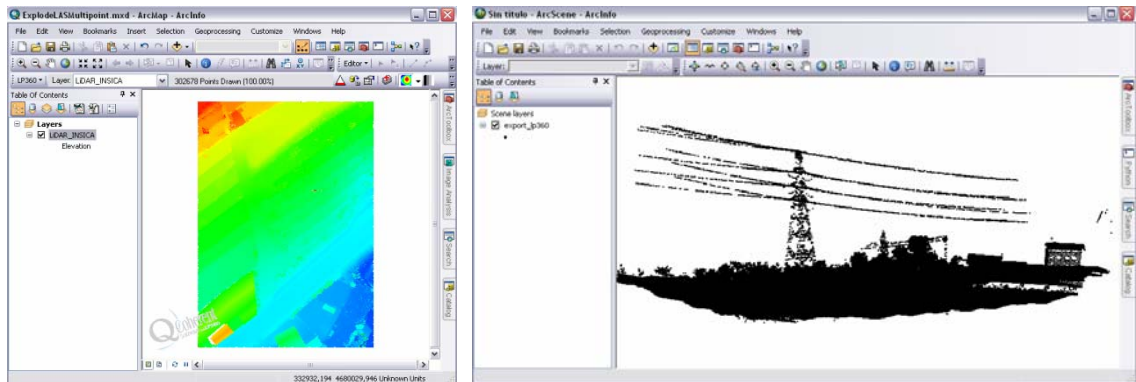


Figura 3.3. Visualización de archivo .las en 2D y de shapefiles 3D.

La siguiente figura muestra un visor propio de la extensión LP360, independiente de ArcGIS:

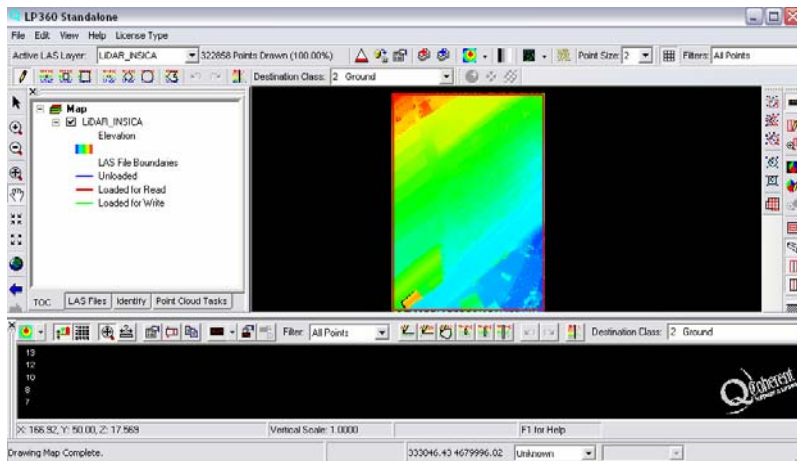


Figura 3.4. Visor independiente de ArcGIS de LP360.

3.1.1.2. LiDAR Analyst 5.0 for ArcGIS

La extensión LiDAR Analyst es una de las más potentes, ya que permite desarrollar procesos de clasificación (entendida como separación de suelo y otras entidades) desde ArcGIS.

LiDAR Analyst está orientada al análisis, mientras que LP360 está más orientada a la integración de datos LiDAR en un SIG, así como su visualización e interpretación por parte de un usuario.

Se trata de una aplicación para la extracción de entidades en 3D de datos LiDAR desarrollada por Overwatch Geospatial de Trexton Systems. La siguiente figura presenta un ejemplo de la barra de herramientas y la visualización de archivos .las.

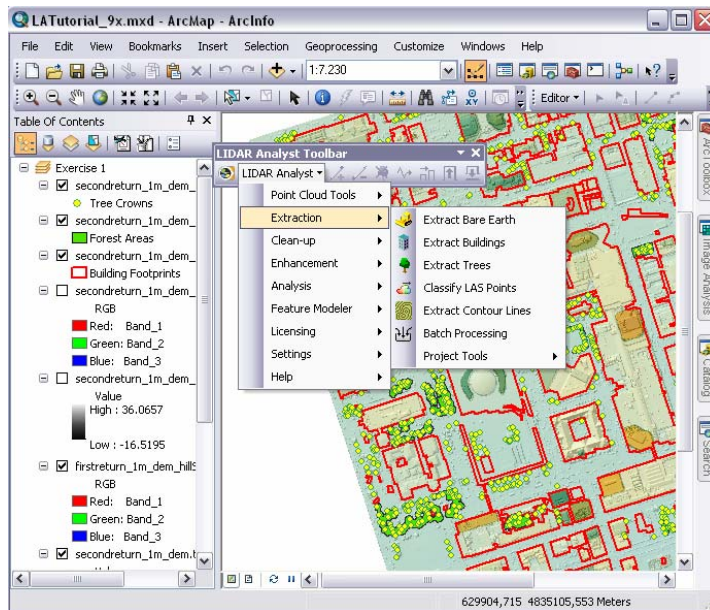


Figura 3.5. Visualización de datos LiDAR con LiDAR Analyst.

Permite realizar numerosos operaciones de administración y tratamiento de archivos .las, sin embargo, no puede competir con la gran cantidad de operaciones de análisis y aplicaciones adicionales de LP360.

3.1.2. Global Mapper 11

El software comercial Global Mapper permite visualizar, tratar y realizar análisis directamente con archivos .las. Del mismo modo, permite visualizar todos sus atributos y trabajar con ellos de la misma forma que cualquier otro archivo vectorial de puntos.

Permite generar MDT's, curvas de nivel y realizar análisis de visibilidad entre otras funciones.

La siguiente figura muestra la visualización de archivos .las con Global Mapper 11 en 2D (izquierda) y en 3D (derecha):

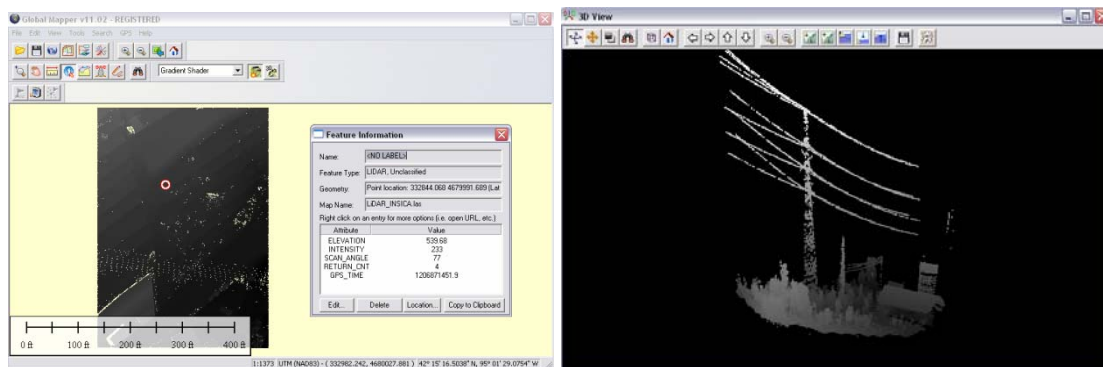


Figura 3.6. Visualización de archivo .las con Global Mapper.

3.1.3. FME (Feature Manipulation Engine)

FME es un software comercial especializado en el tratamiento de datos espaciales. En este punto se han llevado a cabo pruebas con la herramienta de transformación.

La siguiente figura muestra la ventana de configuración (izquierda) y el proceso de transformación de archivos .las a shapefiles (derecha) con FME Universal Translator:

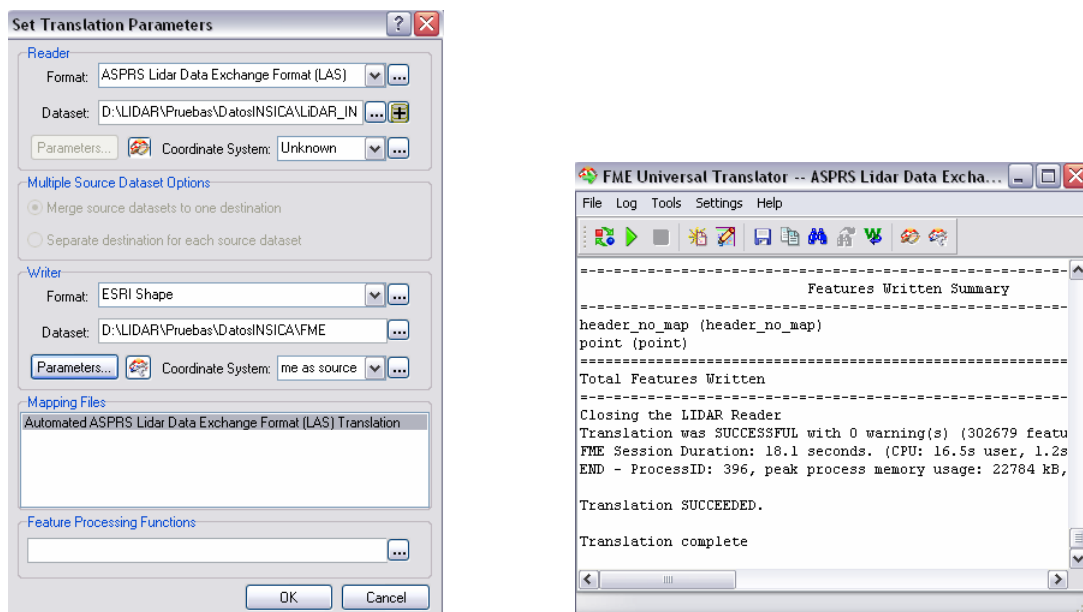


Figura 3.7. Herramienta FME Universal Translator.

Esta herramienta permite pasar directamente de un archivo .las a un archivo shapefile con todos los atributos: forma, datos de GPS, Intensidad, Retornos, Número de retornos, Línea de vuelos, Clasificación, Nombre de la Clasificación, Ángulo de escaneado, Datos de usuario y Fuente.

En la siguiente figura se puede apreciar una tabla que muestra los atributos de un shapefile derivado de un archivo .las transformado con FME:

FID	Shape	GPS TIME	INTENSITY	NUMBER	OF RETURNS	FLAG	LINE	CLASSIFICA	NAME	ANGLE RAIK	USER DATA	SOURCE ID
0	Point ZM	1206871446.01	236	6	4	0	0	0	Created, never classified	119	0	0
1	Point ZM	1206871446.01	242	6	4	0	0	0	Created, never classified	120	0	0
2	Point ZM	1206871446.02	248	6	4	0	0	0	Created, never classified	119	0	0
3	Point ZM	1206871446.03	233	6	4	0	0	0	Created, never classified	120	0	0
4	Point ZM	1206871446.05	234	6	4	0	0	0	Created, never classified	119	0	0
5	Point ZM	1206871446.05	240	6	4	0	0	0	Created, never classified	119	0	0
6	Point ZM	1206871446.05	238	6	4	0	0	0	Created, never classified	120	0	0
7	Point ZM	1206871446.05	232	6	4	0	0	0	Created, never classified	120	0	0
8	Point ZM	1206871446.05	242	6	4	0	0	0	Created, never classified	120	0	0
9	Point ZM	1206871446.06	240	6	4	0	0	0	Created, never classified	118	0	0

Figura 3.8. Atributos de un shapefile derivado de un archivo .las.

Este shapefile generado se puede visualizar en ArcGIS, mostrando todos los atributos originales del archivo .las.

3.2. SOFTWARE GRATUITO

El software gratuito es aquel que se distribuye libremente pero que no puede ser modificado y/o redistribuido libremente.

En este apartado destacan los visualizadores, entre los que he seleccionado dos muy similares: LASEdit y Fugro Viewer. Ambos programas tienen licencias gratuitas y licencias de pago con mayor número de funciones. En este caso se han seleccionado las licencias gratuitas.

También cabe destacar el software FUSION, que permite realizar una mayor variedad de análisis que los visores.

Al igual que en apartado anterior de software comercial, para mostrar estos ejemplos he decidido utilizar la muestra de datos LiDAR de la empresa Insica, de la que también incluyo su visor en este apartado de software gratuito.

3.2.1. LASEdit

Es un visor desarrollado por Cloud Peak Software. Incluye un algoritmo para la extracción de superficies que permite a los usuarios generar modelos del terreno y de superficie. Del mismo modo puede generar curvados y perfiles.

La nube de puntos se puede representar mediante diferentes atributos (clasificación, elevación, intensidad...). Tiene un visor en 3D.

Permite representar los datos por clases, crear perfiles del terreno y visualizar los datos en 3D. La siguiente figura muestra la ventana de configuración (izquierda) y un ejemplo de visualización de un perfil del terreno (derecha):

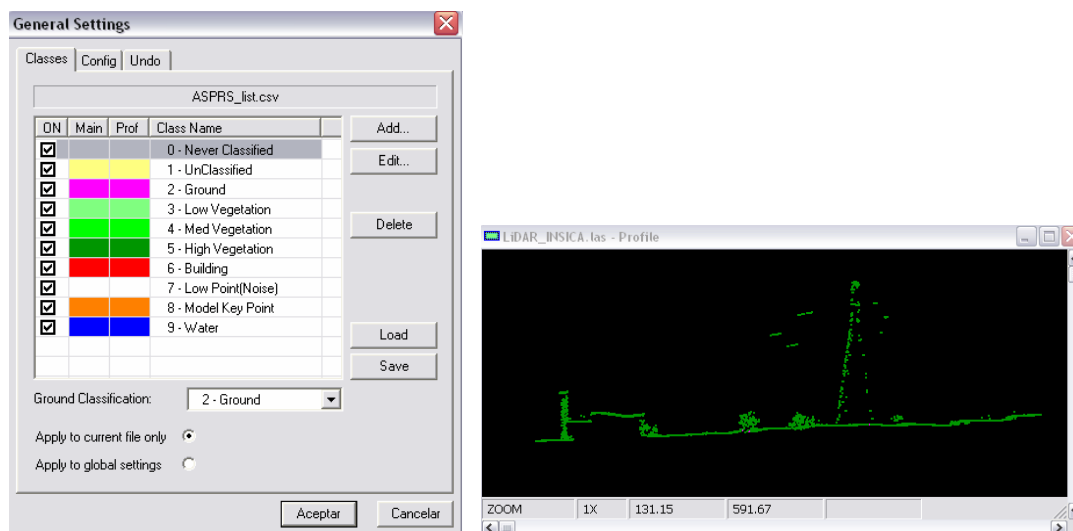


Figura 3.9. Herramienta LASEdit.

La siguiente figura muestra ejemplos de visualización de archivos .las con LASEdit en 2D (izquierda) y 3D (derecha):

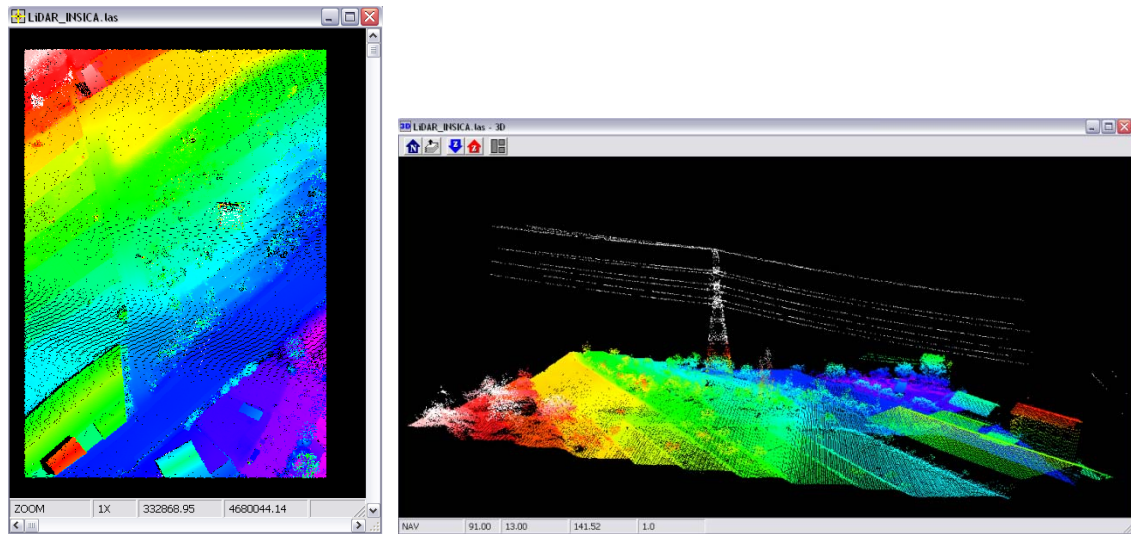


Figura 3.10. Visualización de archivo .las con LASEdit.

3.2.2. Fugro Viewer

La interfaz de Fugro Viewer es la misma que la de LASEdit. La única diferencia es que solo conserva las opciones de visualización y de representación de puntos por atributos, así como la opción en 3D. No permite realizar ningún tipo de análisis ni hay opción para exportar archivos .las a otros formatos.

La siguiente figura muestra la visualización de archivos .las con Fugro Viewer en 2D (izquierda) y 3D (derecha).

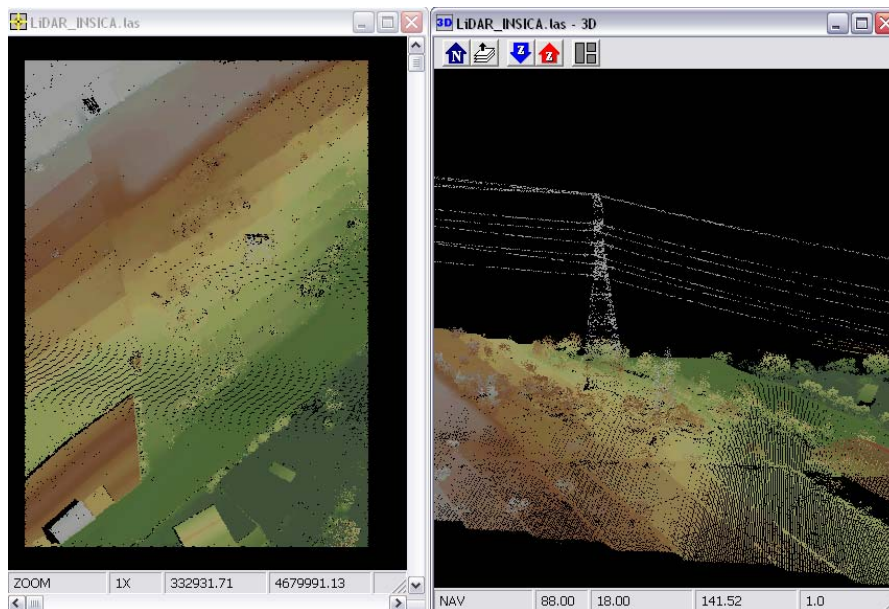


Figura 3.11. Visualización de archivo .las con Fugro Viewer.

3.2.3. FUSION/LDV (LiDAR Data Viewer)

Es un software gratuito desarrollado por el Servicio Forestal y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Está orientado al análisis forestal con datos LiDAR, por lo que sus herramientas se centran exclusivamente en este ámbito.

Trabaja con archivos ráster, archivos .las, shapefiles, archivos de cobertura .csv, MDT.

FUSION también permite exportar archivos .las a otros formatos (ASCII, LDA...), pero no permite exportar a shapefile.

La siguiente figura muestra la aplicación para exportar archivos .las a otros formatos:

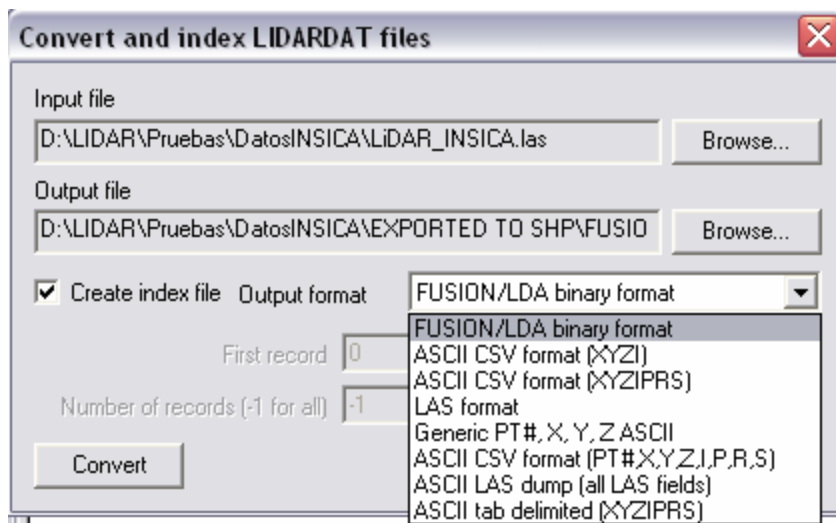


Figura 3.12. Aplicación de FUSION.

3.3. SOFTWARE LIBRE

El software libre es aquel que puede ser usado, copiado, estudiado, modificado y redistribuido libremente. El software libre se refiere a la libertad de los usuarios para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y distribuir el software modificado.

Este trabajo se ha centrado en el uso de un Sistema de Información Geográfica completamente libre, gvSIG, y en una librería de código abierto que permite implementar sus herramientas mediante programación.

También existe una aplicación que permite tratar y analizar datos LiDAR en el entorno de ENVI. El laboratorio aeroespacial de la Universidad Estatal de Idaho ha desarrollado la aplicación de código abierto BCAL LiDAR Tools. Permite tanto el tratamiento como los análisis con archivos .las.

Del mismo modo que en los otros dos apartados anteriores de software comercial y gratuito, para mostrar estos ejemplos se utiliza la muestra de datos LiDAR de la empresa Inisca.

3.3.1. gvSIG 1.1.2 con la extensión Dielmo Open LiDAR

gvSIG es un software libre desarrollado por la Consejería de Infraestructuras y Transportes de la Generalitat Valenciana. Se trata de un Sistema de Información Geográfica para el que se han desarrollado numerosas aplicaciones específicas para determinadas soluciones.

Entre ellas destaca la aplicación de Dielmo Open LiDAR, desarrollada por la empresa Dielmo. Permite el tratamiento, visualización y análisis de archivos .las. Su punto fuerte es la capacidad para mostrar conjuntos de datos con gran cantidad de información junto con otras fuentes (imágenes, shapefiles...). Actualmente se encuentra en desarrollo para generar nuevos productos LiDAR.

Destaca la herramienta para establecer la leyenda en función de determinados atributos: clasificación, intensidad, altura... En el caso de que los datos LiDAR incluyan atributos RGB, también es posible establecer la leyenda por este campo.

La siguiente figura muestra la aplicación de gvSIG para visualizar archivos .las y exportarlos a otros formatos:

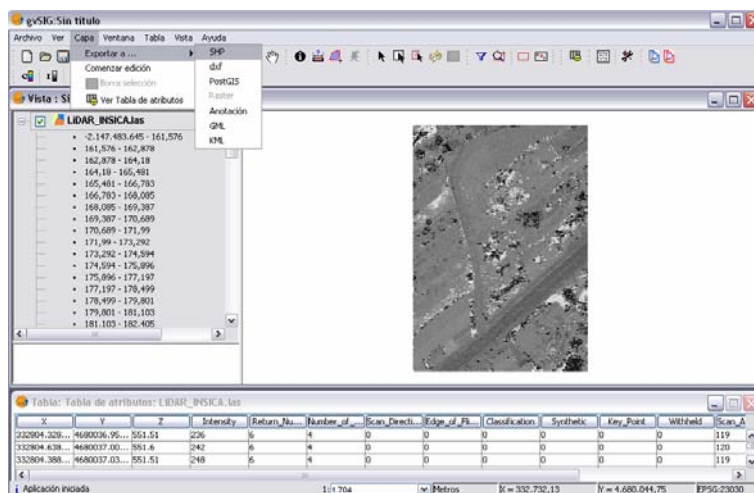


Figura 3.13. Aplicación de gvSIG.

3.3.2. libLAS y LAStools

3.3.2.1. libLAS

Es una librería para leer y escribir datos geospaciales en el formato de archivo .las establecido por la ASPRS y en las versiones 1.0, 1.1 y 1.2. El software de libLAS consiste en una librería de base con múltiples interfaces de programación de aplicaciones (API's), disponible para lenguajes de programación (C, C++, Python, .NET Framework...). Del mismo modo, proporciona una gran cantidad de líneas de comando para transformar los archivos .las de una versión a otra, así como pasarlos a archivos de texto.

El desarrollo inicial de libLAS lo llevó a cabo por el Instituto Geológico de Iowa, en el marco del proyecto estatal de captura de datos LiDAR.

Todas estas librerías y herramientas están orientadas al diseño y el desarrollo de aplicaciones en Sistemas de Información Geográfica libres, cuyos códigos se pueden modificar y personalizar.

3.3.2.2. LAStools

Se trata de una interfaz de programación de aplicaciones basada en libLAS, que implementa la lectura y escritura de datos LiDAR en los formatos establecidos por la ASPRS. Está construida sobre las herramientas de la librería de libLAS.

Las herramientas de LAStools son líneas de comando altamente eficaces que permiten procesar tanto archivos .las como archivos comprimidos .laz.

Destacan herramientas para subdividir los datos LiDAR, hacer recortes, leer los archivos cabecera, transformar a archivos.las, crear MDT, TIN, unir conjuntos de datos, convertir a shapefile, transformar en archivo de texto,... como muestra la siguiente figura:

- LASlib (with LASzip) C++ API and source code: [laslib.zip](#) and [README](#)
- LAStools (source code, linux makefile, window project, binaries): [lastools.zip](#) and [LICENSE](#)
- [lasgrid.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [lastile.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [lassort.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [lasclip.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [lasinfo.exe](#) and [README](#)
- [lasthin.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [las2las.exe](#) and [README](#)
- [lasboundary.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [las2tin.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [las2dem.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [las2iso.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [lasmerge.exe](#) and [README.txt](#)
- [lasprecision.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [las2shp.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [shp2las.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [lasview.exe](#) and [README](#) and [GLUT32.DLL](#)
- [laszip.exe](#) and [README](#) and [LIDAR forum](#)
- [las2txt.exe](#) and [README](#)
- [txt2las.exe](#) and [README](#)
- [gzip.exe](#), [unzip.exe](#), [UnRAR.exe](#), [7z.exe](#) need to be in the path for reading compressed ASCII

Figura 3.14. Herramientas incluidas en LAStools.

3.3.3 Herramientas LiDAR Solutions

La caja de herramientas LiDAR Solutions (ver figura 3.15) consta de tres modelos de geoprocésamiento desarrollados por Clayton Crawford y presentados en la Conferencia de Usuarios de ESRI de 2010.

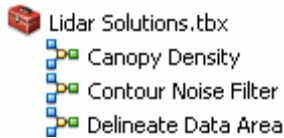


Figura 3.15. Herramientas LiDAR Solutions.

Los modelos de geoprocésamiento se basan en el tratamiento de datos LiDAR en el entorno de ArcGIS 10, por lo que trabaja con productos generados tras el procesamiento de los archivos .las.

- **Data Area Delineation:** delimita el área de estudio a partir del shapefile de multipuntos creado con la herramienta LAS To Multipoint. Genera un shapefile de polígonos.

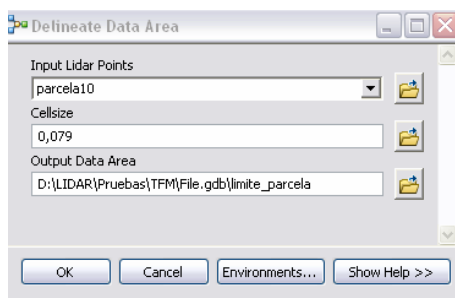


Figura 3.16. Herramienta Data Area Delineation.

- **Canopy Density:** genera un raster que representa la densidad de vegetación. Para ello es necesario dos rasters con la densidad de puntos, uno en superficie y otro de la cubierta vegetal. Los rasters necesarios se pueden crear antes usando la herramienta Point To Raster desde la entidad de multipuntos.

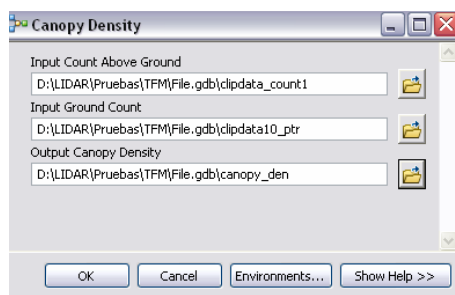


Figura 3.17. Herramienta Canopy Density.

- **Contour Noise Filter:** crea las curvas de nivel a partir de un archivo terrain. Crea las curvas de nivel con un suavizado para evitar formas angulosas. El archivo terrain se debe generar antes en ArcCatalog mediante la entidad de multipuntos.



Figura 3.18. Herramienta Contour Noise Filter.

3.3.4 FELIS Analyst

La herramienta FELIS Analyst permite realizar análisis y tratar datos LiDAR en formato ASCII para transformarlos a shapefile. No permite trabajar directamente con archivos .las.

Está desarrollada para la versión 9.3 de ArcGIS, por lo que algunos objetos a los que hace referencia no pueden ser cargados en la versión 10.

Se trata de una herramienta desarrollada a partir de scripts de ESRI Support, y se ejecuta desde un archivo de mapa .mxd que contiene la herramienta cargada.

Una vez transformados en shapefile, la herramienta permite tratar los datos para georreferenciarlos, normalizarlos, calcular MDT's y MDE's; también para llevar a cabo operaciones de análisis en 3D, creando y analizando raster de aspecto, sombras y pendientes y generando las curvas de nivel.

En cuanto a las operaciones de extracción, estas están orientadas a la extracción de huellas de edificios, vegetación, áreas forestales, elevación de la cubierta forestal y composición forestal. La siguiente figura muestra diversas herramientas para el tratamiento de datos LiDAR (izquierda) y para la extracción de entidades (derecha):

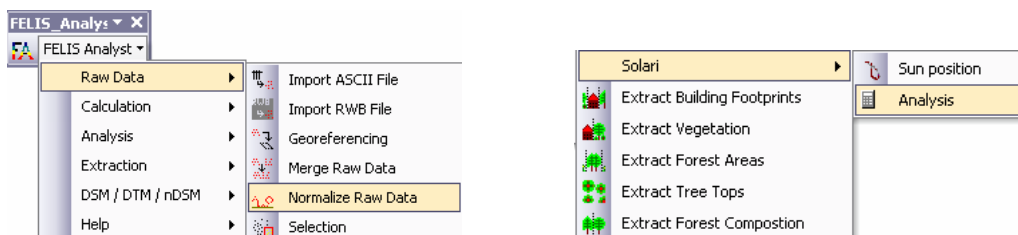


Figura 3.19. Herramientas FELIS Analyst.

PARTE III

Desarrollo de la Investigación

Capítulo 4

Tratamiento de los datos LiDAR con ArcGIS 10

Este capítulo se centra específicamente en la manera en la que el software ArcGIS 10 muestra la información de los datos LiDAR, cuáles son los campos de información más relevantes para este caso concreto y los métodos existentes para visualizarlos en ArcGIS.

A continuación recoge la metodología empleada en el proceso de transformación de los archivos .las a shapefile, extrayendo determinados atributos, y la creación de modelos de procesado y de normalización.

4.1. ACCESO A LA INFORMACIÓN DE LOS DATOS LIDAR

4.1.1. Introducción

En la mayor parte de los análisis con datos LiDAR no se usan todos los atributos de forma simultánea ya que, en función del tipo de análisis o estudio que se quiera realizar, este se apoyará en unos atributos determinados.

De este modo, los retornos son necesarios para análisis forestales y urbanos, aunque hay opciones que permiten realizar esos análisis con los atributos de intensidad. Las clasificaciones son fundamentales, aunque es posible realizar otro tipo de clasificaciones en función de los retornos. Lo cierto es que cuanto mayor y más densa sea la información que nos proporcionan los datos LiDAR, mejores y más aproximados a la realidad serán los productos derivados de los posteriores análisis.

Sin embargo hay una serie de atributos que son comunes y necesarios para todos los análisis. Se trata de la posición y la altura (x, y, z).

4.1.2. Atributos de los datos LiDAR

En el capítulo 2 se han presentado los atributos LiDAR en función de los formatos y las versiones recogidas por la ASPRS. A continuación se presenta un resumen de los atributos comunes de los datos LiDAR almacenados en archivos .las:

- X: posición el longitud.
- Y: posición en latitud.
- Z: elevación.
- Intensidad: valor que representa la magnitud del retorno del pulso.
- Retorno: valor del retorno que ha devuelto ese punto.
- Número de retornos: número total de retornos para un pulso determinado.
- Clasificación: valor que recoge el tipo de punto según el retorno del pulso.
- Ángulo de escaneado: valor del ángulo en el que fue disparado el pulso láser desde el avión.
- Identificador: valor único dado a cada uno de los puntos del conjunto de datos.
- Datos de usuario: campo reservado para el usuario.
- Dirección de escaneado: dirección del espejo del escáner en el momento de realizar el disparo del pulso láser.
- Dirección de vuelo: marca el cambio de dirección de vuelo. Aparece con valor 1 en la última línea de puntos escaneados antes de cambiar la dirección de vuelo.
- Información GPS: datos GPS del punto en el momento de capturarse.

4.1.3. El problema de la altura

El programa ArcGIS 10 de ESRI no permite visualizar, tratar, manipular o analizar archivos .las directamente ya que almacena los atributos en formato binario. En el capítulo anterior se ha hecho referencias a este formato binario: BLOB (conjunto de datos binario almacenados como una única entidad en una base de datos que permite su compresión).

De igual modo, el elevado número de retornos que dan lugar a la nube de puntos hace que ArcGIS tenga problemas para cargar todos esos atributos en una tabla y administrarlos con facilidad.

4.2. SOLUCIONES PARA EL TRATAMIENTO DE LOS DATOS LIDAR EN ARCGIS 10

Entre las posibles soluciones se ha presentado una breve aproximación al software existente para el tratamiento de datos LiDAR. Como se ha visto, existe una amplia gama de aplicaciones orientadas al tratamiento de archivos .las. Debido a su elevado coste se ha descartado el software y las extensiones comerciales relacionadas con ArcGIS, que es el que nos ocupa en este caso. Por esta razón se ha optado por soluciones gratuitas y, a ser posible, libres para poder manipularlas en caso de ser necesario.

4.2.1. Visualización de datos Lidar en ArcGIS 10

ArcGIS 10 presenta una serie de herramientas para facilitar el tratamiento de datos LiDAR, aunque presenta ciertas limitaciones.

Las herramientas diseñadas específicamente para el tratamiento de archivos .las se localizan en el conjunto de herramientas de análisis 3D orientadas a la conversión de archivos, como se muestra en la siguiente figura:

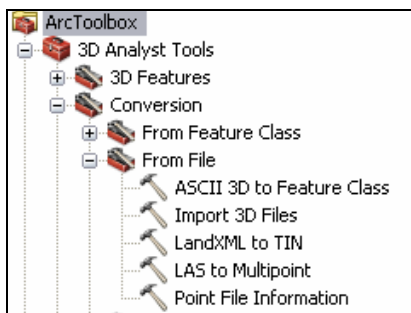


Figura 4.1. Herramientas de análisis 3D.

Para usarlas es necesario activar la extensión 3D Analyst.

4.2.1.1. La herramienta Point File Information

La herramienta de información de punto permite obtener información del conjunto de datos LiDAR almacenados en el archivo .las.

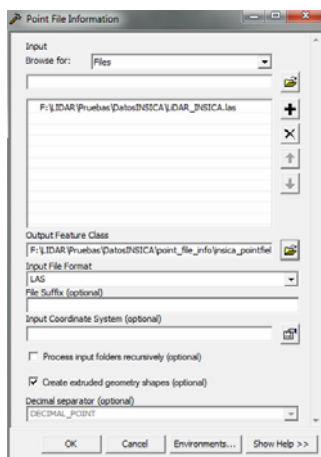


Figura 4.2. Ventana de la herramienta Point File Information.

De este modo presenta información resumida del número de puntos almacenados en el archivo .las, el espacio medio entre estos puntos, el valor de elevación mínimo y el valor de elevación máximo. El resultado es un shapefile que muestra la forma de la extensión completa de los datos LiDAR, como muestra la siguiente figura:

FID	Shape *	FileName	Pt Count	Pt Spacing	Z Min	Z Max
0	MultiPatch M	LIDAR_INSICA.las	302678	0,216196258168	526,614990234	589,161010742

Figura 4.3. Resultados de la herramienta Point File Information.

4.2.1.2. La herramienta LAS To Multipoint

El problema para representar los puntos en ArcGIS se ha solucionado cargando los datos de los puntos en una entidad conocida como multipunto dentro de una geodatabase. La entidad de multipunto permite almacenar miles de puntos en una única fila de información de la tabla de atributos.

De esta manera, la herramienta diseñada específicamente para la transformación de archivos .las es LAS to Multipoint, también localizada en las herramientas de análisis 3D orientadas a la conversión de archivos.

Esta herramienta requiere un archivo .las o una carpeta que contenga un conjunto de archivos .las.

A continuación es necesario dar un nombre al archivo de salida y un valor medio para el espaciado entre puntos.

Los siguientes parámetros son opcionales:

- Códigos de clasificación (ver figura 4.4): si queremos filtrar los puntos en función de su clasificación debemos introducir el valor de aquellas clasificaciones que deseamos ver.

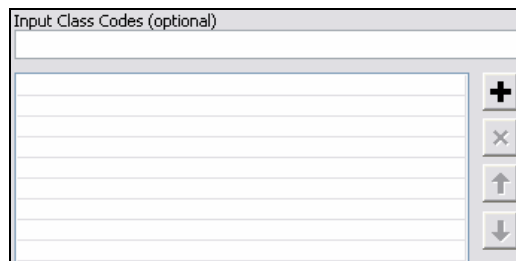


Figura 4.4. Ventana de selección de códigos de clasificación (LAS to Multipoint).

- Valores de retorno (ver figura 4.5): los valores de retorno pueden ser todos y/o los retornos numerados de 1 a 8 de forma independiente. Por otra parte es posible seleccionar solo los últimos retornos para filtrar todos los objetos de la superficie dejando exclusivamente el suelo desnudo. Hay que tener en cuenta que no es posible seleccionar solo los últimos retornos junto con otros retornos.

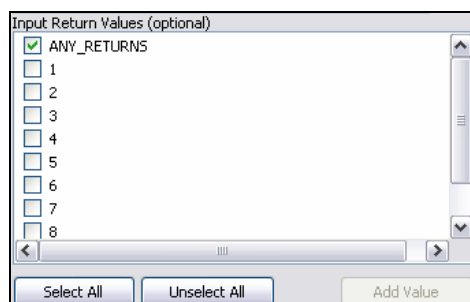


Figura 4.5. Ventana de selección de valores de retorno (LAS to Multipoint).

- Nombres de los atributos (ver figura 4.6): es posible seleccionar aquellos atributos que necesitemos de los archivos .las, sin embargo estos se almacenarán en formato BLOB, por lo que no es posible visualizarlos, salvo personalizando ArcObjects como nos indica la ayuda de ArcGIS.

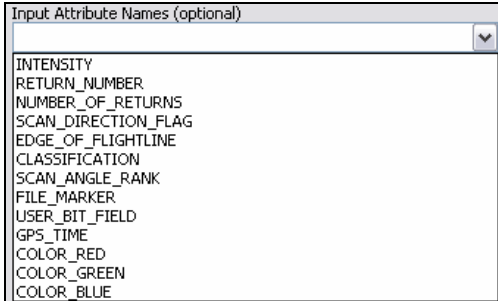


Figura 4.6. Ventana de selección de atributos (LAS to Multipoint).

- Sistema de coordenadas (ver figura 4.7): se puede seleccionar de otro archivo o asignar un nuevo sistema de coordenadas al archivo de salida.



Figura 4.7. Selección de sistema de coordenadas (LAS to Multipoint).

- Sufijo de los archivos a transformar (ver figura 4.8): en el caso de seleccionar una carpeta donde haya archivos .las con otra extensión.



Figura 4.8. Sufijo de los archivos de entrada (LAS to Multipoint).

- Factor de conversión vertical (ver figura 4.9): si fuese necesario es posible introducir un valor para transformar las unidades de elevación (por ejemplo de pies a metros).

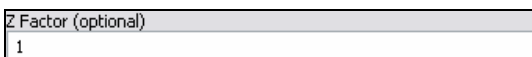


Figura 4.9. Selección del factor de conversión vertical (LAS to Multipoint).

La siguiente figura muestra cómo se visualizan los archivos de multipuntos como una nube de puntos que no se puede clasificar por ninguno de sus atributos (identificador y número de puntos por fila):

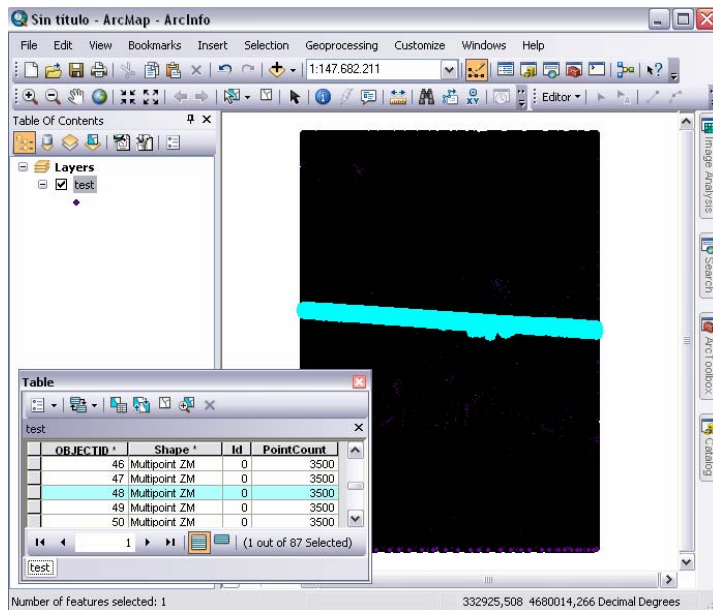


Figura 4.10. Visualización de entidades de multipunto.

4.2.1.3. Conversión de multipuntos a puntos: la herramienta Multipart To Singlepart

El siguiente paso es convertir la entidad de multipuntos en una entidad de puntos. Esto se puede hacer en una sesión de edición con la herramienta explode de la barra de herramientas de Edición Avanzada o directamente con la herramienta Multipart To Singlepart (ver figura 4.11), localizada en la caja de herramientas de Administración de Datos. La primera opción es más lenta y puede provocar una saturación en la sesión de edición si la nube de puntos es muy densa.

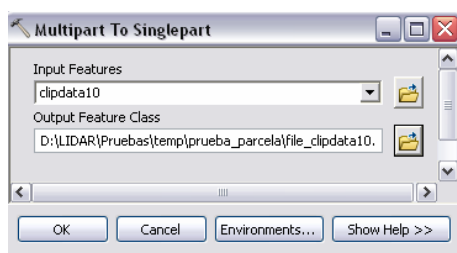


Figura 4.11. Herramienta Multipart To Singlepart.

La herramienta Multipart To Singlepart realiza automáticamente el proceso, dando como resultado una entidad de puntos con los atributos de identificación y forma (ID y Shape), como se puede apreciar en la siguiente figura:

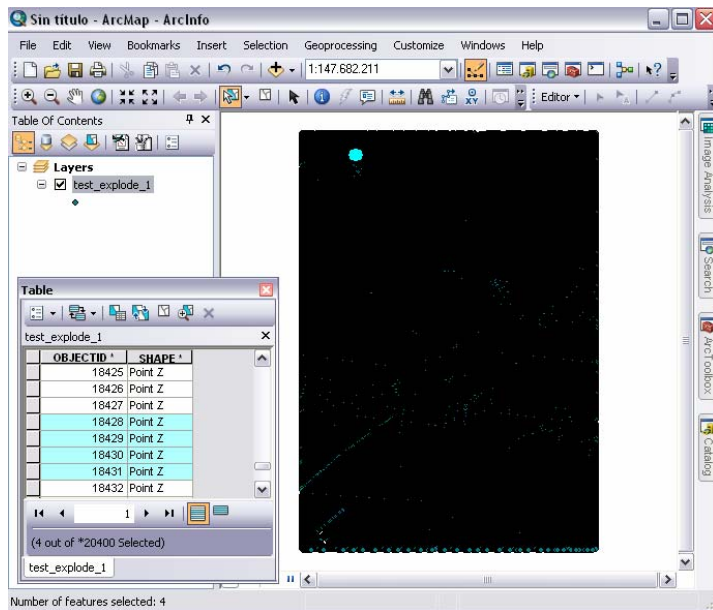


Figura 4.12. Visualización de la entidad de puntos de elevación.

Tanto la entidad de puntos como la de multipuntos se pueden visualizar en 3D en ArcScene:

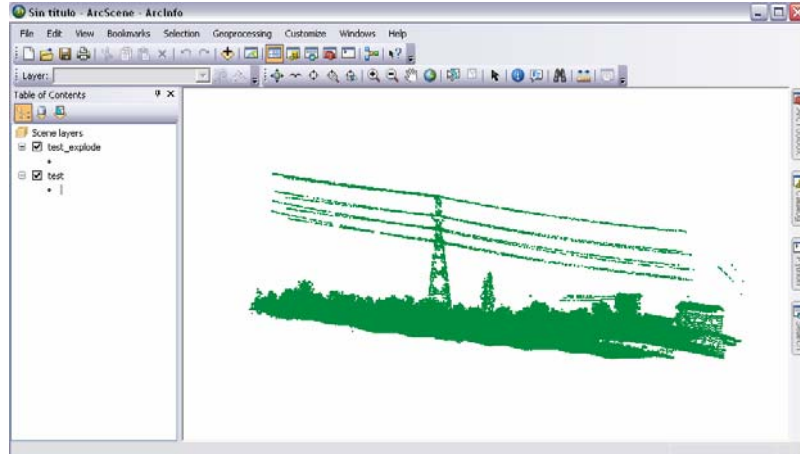


Figura 4.13. Visualización en 3D con ArcScene.

4.2.2. Visualización del atributo de elevación en ArcGIS 10

4.2.2.1. La herramienta Add XY Coordinates

La herramienta Add XY Coordinates se encuentra entre las herramientas de Administración de Datos de ArcToolbox. Esta herramienta crea tres nuevos campo en la tabla de atributos de la entidad de puntos seleccionada y calcula las coordenadas en latitud y en longitud, así como el valor de elevación de cada uno de los puntos. Se trata de una herramienta muy útil una vez que la entidad de multipuntos se disuelve en puntos individuales. La siguiente figura muestra la ventana de la herramienta Add XY Coordinates y una muestra de la tabla de atributos resultante:

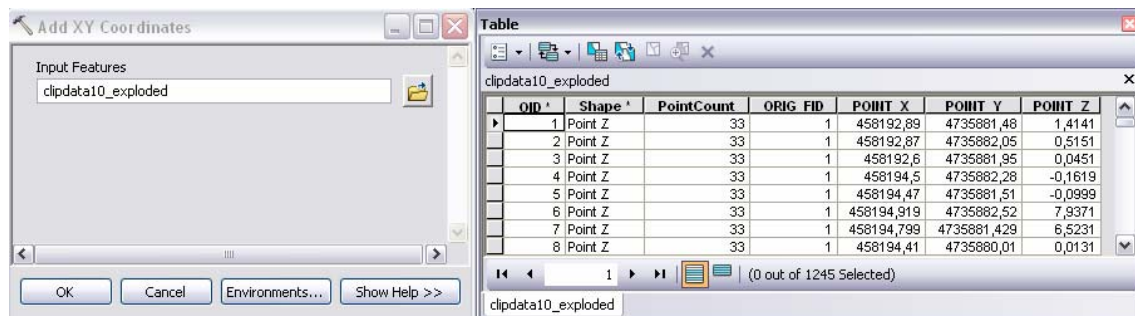


Figura 4.14. Herramienta Add XY Coordinates.

4.2.2.2. Los Scripts de ESRI Support

Los scripts de ESRI son pequeñas aplicaciones desarrolladas por usuarios de ESRI que ofrecen soluciones a la comunidad de usuarios. Son gratuitas y modificables, por lo que nos permiten adaptarlas a nuestras necesidades.

Los scripts más útiles por su efectividad a la hora de permitir la visualización del campo de elevación de los datos LiDAR son los siguientes:

- **IntensityBlobToZ:** sustituye el atributo de intensidad por el valor de elevación para las entidades de multipunto. Este proceso no permite ver el valor del atributo de elevación, ya que solo se refleja si se crea una imagen de intensidad con la herramienta Point to Raster.
- **ExplodeLASMultipoint:** transforma la entidad de multipuntos en una entidad de puntos y añade el atributo de elevación (denominado SPOT) y un atributo numérico con valores para los datos en formato BLOB, como se puede observar en la siguiente figura:

OBJECTID	Shape	Id	PointCount
1	Multipoint ZM	0	3500
2	Multipoint ZM	0	3500
3	Multipoint ZM	0	3500
4	Multipoint ZM	0	3500
5	Multipoint ZM	0	3500
6	Multipoint ZM	0	3500
7	Multipoint ZM	0	3500
8	Multipoint ZM	0	3500
9	Multipoint ZM	0	3500
10	Multipoint ZM	0	3500

OBJECTID	SHAPE	Spot
1	Point Z	551,51
2	Point Z	551,6
3	Point Z	551,51
4	Point Z	551,48
5	Point Z	551,54
6	Point Z	551,51
7	Point Z	551,54
8	Point Z	551,43

Figura 4.15. Resultados del script ExplodeLASMultipoint.

Ambos se aplican a entidades de multipunto previamente importadas de archivos .las con la herramienta LAS to Multipoint.

Las instrucciones básicas para ambos son las siguientes:

- La primera capa en el documento de mapa será la capa de entrada.
- Esta capa de entrada debe estar en una geodatabase (recomiendan una de archivo por su mayor capacidad), donde se guardará la capa de salida.

Se ejecutan desde el Editor de Visual Basic, como muestra la siguiente figura:

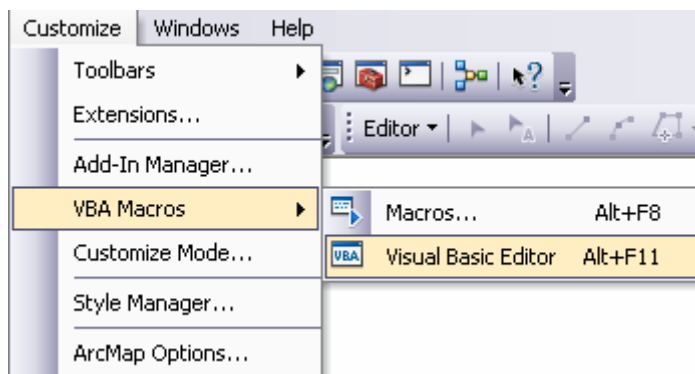


Figura 4.16. Acceso al Editor de Visual Basic.

Una vez en el entorno de Visual Basic (ver figura 4.17) hay que abrir los archivos .bas, desde Archivo la opción Importar. Para ejecutarlos basta con pulsar el botón Run o presionar F5.

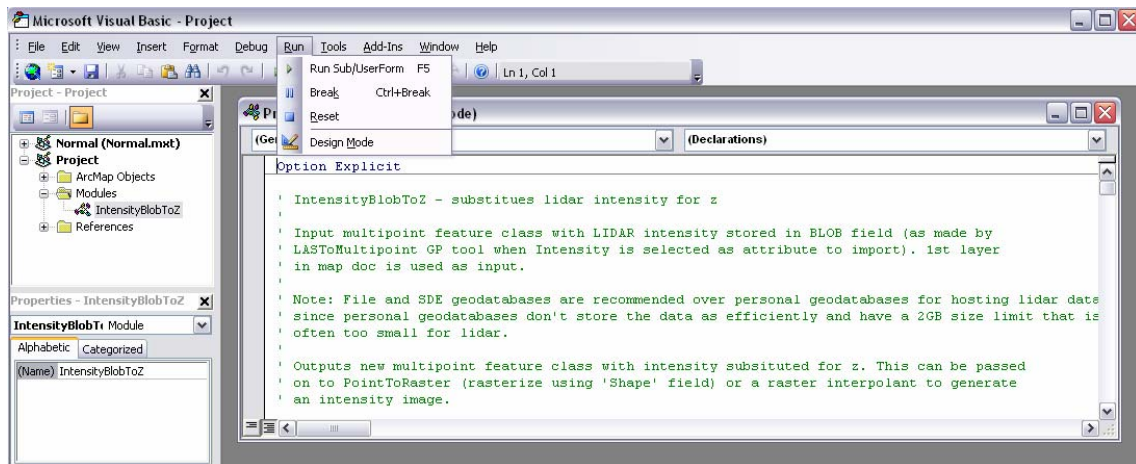


Figura 4.17. Script IntensityBlobToZ en el editor de Visual Basic.

Como muestra la siguiente figura, al ejecutarlos se abre una ventana que solicita el nombre del archivo (sin la ruta, ya que se almacena en la geodatabase donde están los datos de partida).

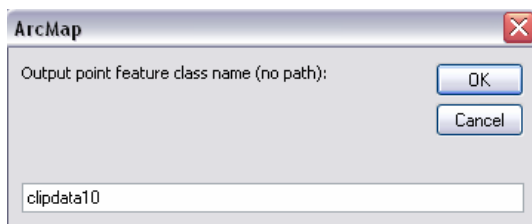


Figura 4.18. Ventana del nombre de la entidad de salida.

4.2.2.3. Aplicaciones fuera del entorno de ArcGIS 10

Las herramientas de código abierto LAsTools permiten transformar archivos .las en shapefiles. Sin embargo presentan un inconveniente muy importante, ya que hacen la misma operación que ArcGIS, transformando los datos LiDAR en entidades de multipunto. Por esta razón esta herramienta queda descartada al existir otra dentro del ámbito de ArcGIS.

Por otra parte, cabe la posibilidad de usar un software gratuito y/o libre complementario, que permita transformar el archivo .las a shapefile fuera del ámbito de ArcGIS. A pesar de que esta opción ha quedado descartada, ya que el objetivo del trabajo es realizar el proceso dentro del entorno de ArcGIS, existe la opción de usar un Sistema de Información Geográfica suplementario. Es el caso de gvSIG junto con la extensión Dielmo Open LiDAR, que permite transformar los archivos .las a shapefiles. Esta opción supone apoyar un SIG comercial en un SIG libre.

4.3. MODELO DE GEOPROCESAMIENTO DE DATOS LIDAR

Los datos LiDAR requieren superar una serie de filtros antes de poder trabajar con ellos en cualquier tipo de aplicación. Por lo general, los datos LiDAR sufren una serie de procesos de depuración antes de ser almacenados en formato .las.

Este primer tamizado, limpia todos los datos excéntricos que son consecuencia de errores, tanto del sensor como de los datos erróneos.

Un segundo filtro de los datos antes de almacenarse en formato .las es el que permite separar el suelo de la vegetación y de los objetos sobre la superficie terrestre. Este permite rellenar el atributo de la clasificación para posteriores procesos de selección.

Normalmente los datos empleados para realizar análisis ya han pasado estos procesos, por lo que el presente trabajo se centra en el procesamiento de los archivos .las clasificados.

En este apartado del trabajo se va a proceder a presentar una serie de modelos de geoprocesamiento desarrollados desde ArcGIS 10 para trabajar con datos LiDAR. Estos modelos se centran en el flujo de trabajo orientado al almacenamiento y la depuración de los datos LiDAR para su posterior aplicación en estudios forestales.

En primer lugar se presenta el modelo de almacenamiento de datos LiDAR. Estos sencillos modelos son la base para crear y administrar el espacio de trabajo donde se desarrollará el flujo de trabajo.

A continuación se muestra el modelo de carga de datos LiDAR en ArcGIS 10. Se basa en la transformación de archivos .las en shapefile. Este el modelo permite cargar los datos LiDAR en ArcGIS intentando conservar la mayor parte de sus atributos para mantener su precisión. Esto nos permite preparar los datos en ArcGIS, lo que nos servirá para cualquier aplicación posterior.

4.3.1. Modelo de creación del espacio de trabajo

Hay que tener en cuenta que es necesario almacenar todos los datos en una geodatabase. Esto permite manejar los datos LiDAR y tratar la información de una manera más ágil y compacta, recogiendo todos los shapefiles dentro de un conjunto de datos de entidades (Feature Dataset).

La elección de un tipo de geodatabase u otra depende de las características del estudio. Si las muestras de datos LiDAR suponen gran cantidad de puntos almacenados en archivos .las, es recomendable elegir una geodatabase de archivo (File Geodatabase), que permite almacenar desde 1 TB hasta 256 TB. La geodatabase personal (Personal Geodatabase) puede almacenar hasta 2GB, debido a que es un formato Access (.mdb).

A continuación, las figuras 4.19 y 4.20 presentan dos sencillos modelos que permiten crear un espacio de trabajo donde almacenar los datos LiDAR. Sus parámetros se centran exclusivamente en las rutas de creación de las geodatabases y el sistema de coordenadas seleccionado.



Figura 4.19. Modelo de creación de una Personal Geodatabase.



Figura 4.20. Modelo de creación de una File Geodatabase.

4.3.2. Modelo de carga de datos LiDAR en ArcGIS 10

El modelo de carga de datos LiDAR permite transformar los archivos .las en shapefile para visualizar la nube de puntos en ArcGIS. En este apartado se muestran dos tipos de modelos: el primero de ellos realizado exclusivamente con herramientas de ArcGIS y el segundo con herramientas de ArcGIS apoyadas en uno de los scripts explicados en el capítulo anterior.

Por último se ha incluido un apartado para crear un botón en ArcMap que permita hacer las mismas operaciones que el script de ESRI Support.

4.3.2.1. Modelo de carga de datos con herramientas de ArcGIS

Este modelo nos permite realizar una transformación de los archivos .las en shapefiles y calcular sus atributos de posicionamiento mediante la aplicación de una serie de herramientas de ArcToolbox.

En función de las herramientas utilizadas en este modelo (ver figura 4.21), el flujo de trabajo es el siguiente:

- Calcular extensión del archivo, altura media, mínima y máxima, así como el número total de puntos y la distancia media entre estos.
- Pasar el archivo .las a shapefile, entidad de multipuntos con valores de elevación.
- Pasar de entidad de multipuntos a entidad de puntos (con valores de elevación).
- Añadir tres nuevos campos para calcular las coordenadas en latitud y longitud, así como la altura en metros de cada punto.
- Crear una imagen de intensidad a partir de los datos LiDAR y su atributo de intensidad.

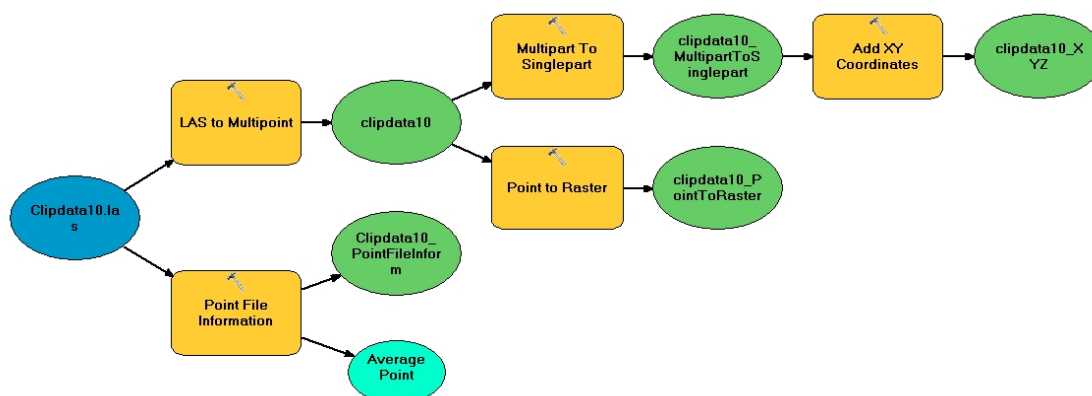


Figura 4.21. Modelo de carga de datos LiDAR.

La imagen de intensidad se puede crear mediante la herramienta Point To Raster. Esta herramienta solo puede utilizarse con entidades de multipunto, ya que son las que almacenan los atributos en formato BLOB, en este caso el atributo de intensidad. Una vez que la entidad de multipuntos se transforma en entidad de puntos, estos atributos almacenados en formato BLOB se pierden.

4.3.2.2. Modelo de carga de datos con herramientas de ArcGIS y script de ESRI Support

Este modelo permite obtener de una manera más rápida y eficaz todos los atributos de los archivos .las, incluyendo el valor de elevación, en un solo paso mediante un script. Para ello es necesario tener un conocimiento previo de los campos que contienen los archivos .las para poder filtrarlos en ArcGIS. La mejor solución es usar un editor gratuito de datos LiDAR y comprobar los campos de sus atributos.

El flujo de trabajo es el siguiente:

- Comprobar los atributos del archivo .las en un editor (por ejemplo, LASEdit).
- Ejecutar la herramienta LAS To Multipoint desde ArcGIS, incluyendo aquellos atributos presentes en el archivo .las que sean necesarios.
- Ejecutar el script ExplodeLASMultipoint desde el editor de Visual Basic de ArcMap, tal como se muestra en la siguiente figura:

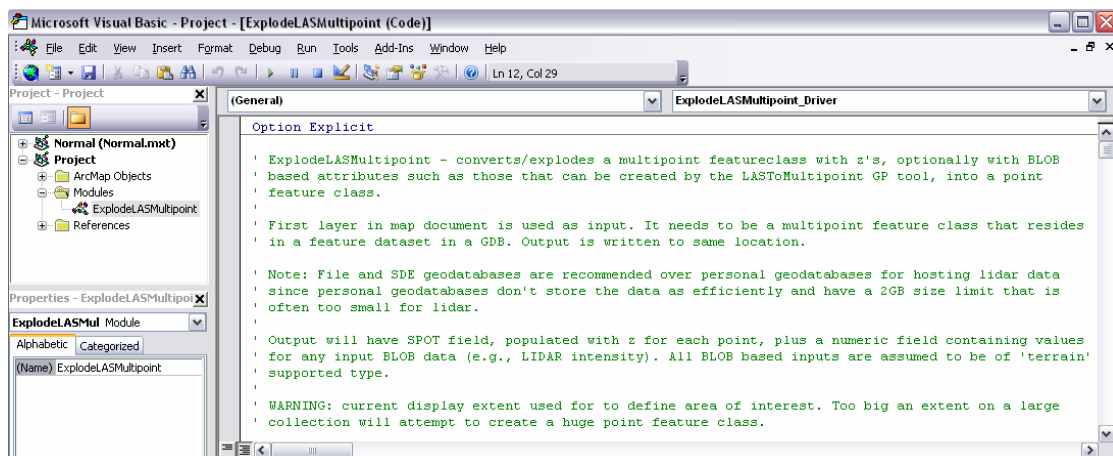


Figura 4.22. Script ExplodeLASMultipoint en el editor de Visual Basic.

Este proceso da como resultado un archivo shapefile de puntos con los valores de elevación y los atributos seleccionados. Estos atributos no son visibles en la tabla de atributos de la entidad de multipuntos debido a que están almacenados en formato BLOB. Sin embargo, el script se encarga de transformarlos y asignarlos a cada uno de los puntos de forma individual.

Mediante las opciones de personalización de ArcGIS 10 es posible configurar un botón para realizar las mismas operaciones del script ExplodeLASMultipoint.

4.3.2.3. Creación del botón ExplodeLASMultipoint

El script ExplodeLASMultipoint se puede configurar para ejecutarlo como un botón desde ArcMap. Para ello es necesario abrir la ventana Customize Mode (Modo personalizado), como se muestra en la siguiente figura:

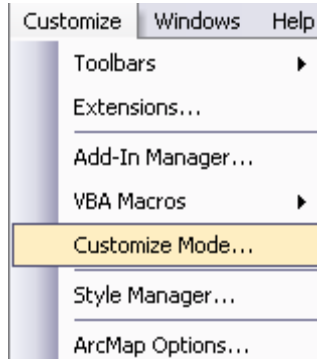


Figura 4.23. Modo de personalización en ArcMap.

Una vez dentro hay que seleccionar Comandos y al final de la lista seleccionar [UIControl] y a continuación Nuevo UIControl (ver figura 4.24). Esto abrirá una nueva ventana que nos permite elegir entre diferentes opciones: botón, herramienta, caja de edición o combo. Hay que elegir la opción de botón.

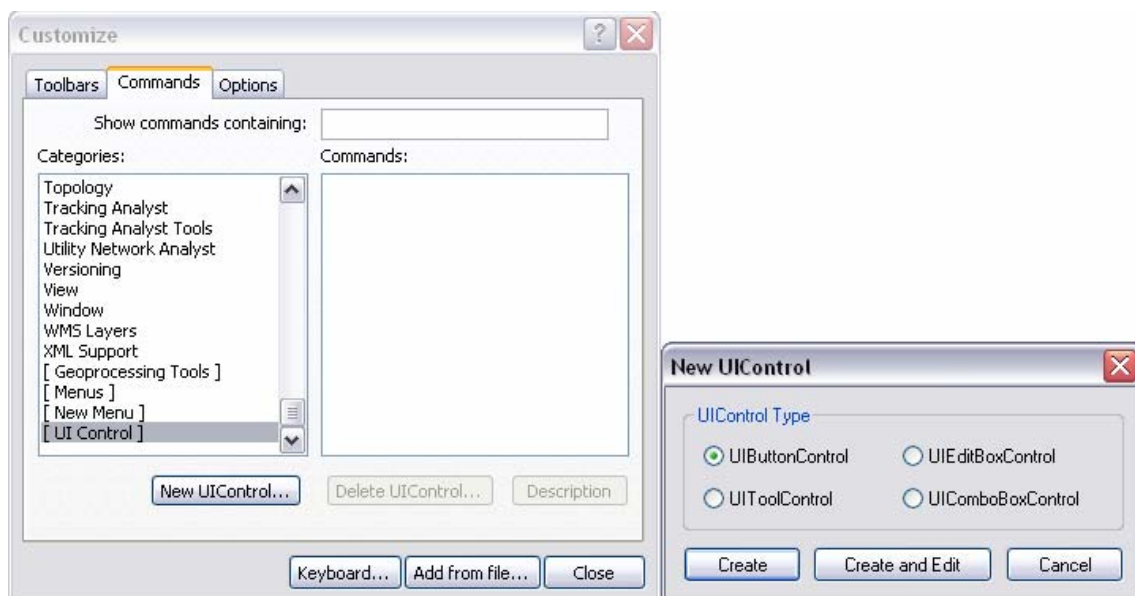


Figura 4.24. Creación de un nuevo botón en ArcMap.

Al seleccionar el botón, aparecerá en la ventana de personalización. Desde ahí se puede arrastrar para anclarlo en una de las barras de herramientas activadas por defecto en ArcMap. Una vez anclado, y con la ventana de personalización abierta, hay que pinchar con el botón derecho sobre el botón para ver la fuente (View Source). En este mismo apartado es posible cambiar el nombre del botón así como su icono, como muestra la siguiente figura:

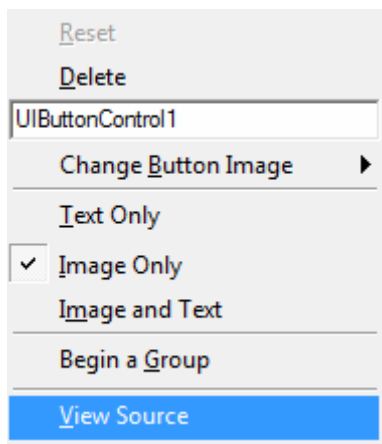


Figura 4.25. Opciones de configuración de botones.

Al seleccionar la vista de fuente se abrirá la ventana de edición de Visual Basic con el script que tengamos cargado o el que queramos cargar (desde Archivo>Importar). En la ventan de código que aparece en primer plano hay que escribir la llamada al script, en este caso ExplodeLASMultipoint_Driver (ver figura 4.26). A continuación guardamos la edición en Visual Basic y el botón ya está listo para usarse.

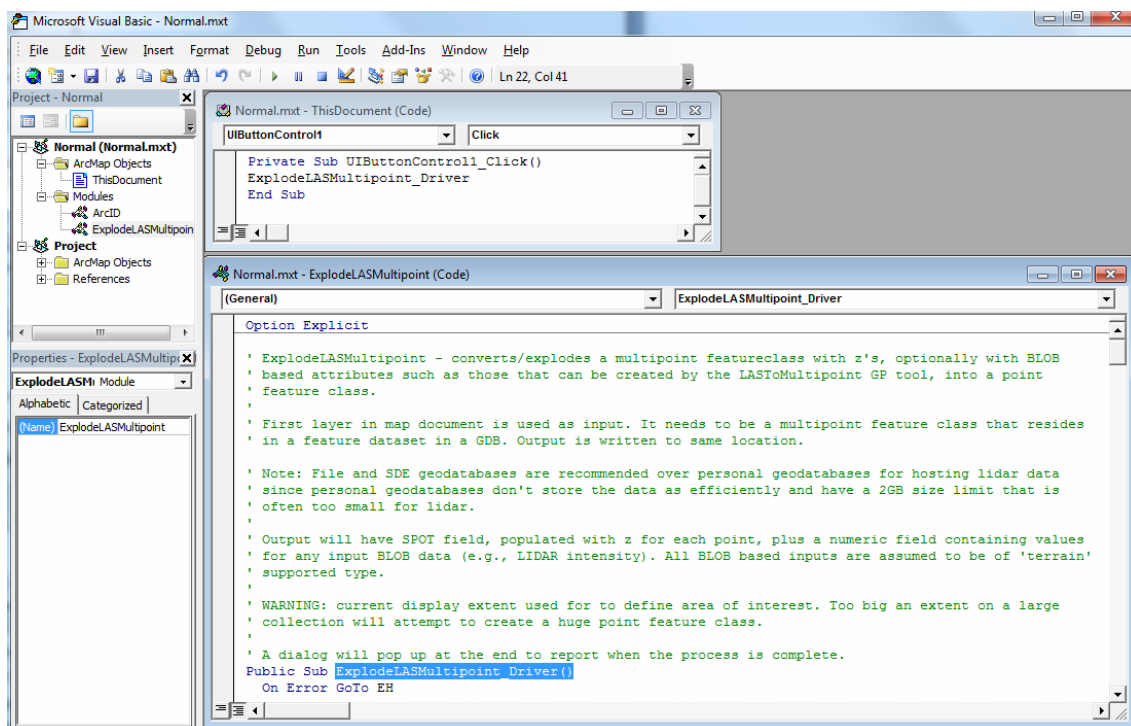


Figura 4.26. Código fuente del botón ExplodeLASMultipoint en el editor de Visual Basic.

Capítulo 5

Aplicaciones forestales con datos LiDAR

Este capítulo se centra en la aplicación de los procesamientos de datos LiDAR, recogidos en el capítulo anterior, para desarrollar metodologías orientadas a la realización de inventarios forestales.

5.1. LAS NECESIDADES DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN, TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE

El Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible se dedica a estudios forestales mediante datos LiDAR. Entre sus proyectos destaca uno orientado a medir el volumen maderable y la biomasa de determinadas zonas forestales mediante la comparación de datos de campo y datos LiDAR.

Los datos LiDAR con los que trabajan llegan pre-procesados, es decir, reciben un primer filtro para eliminar los datos erróneos y se rellenan los atributos de la clasificación separando el suelo de la vegetación (pero sin tocar los atributos de elevación).

Una vez recibidos los datos LiDAR, el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible debe filtrar los datos de suelo y los datos de vegetación a través de su atributo de elevación, en el caso de que los datos no estén clasificados. Este proceso se denomina Ground Filter dentro del software FUSION, aunque también se conoce como proceso de normalización en el ámbito de las aplicaciones forestales de datos LiDAR. Permite extraer los puntos que corresponden al suelo y generar un archivo .las exclusivamente con los datos a nivel de suelo.

Para este proceso es fundamental entender la diferencia entre altura y altitud:

- La altitud se refiere a la elevación del conjunto de puntos sobre el nivel del mar, tanto del suelo como de los objetos sobre la superficie terrestre.
- La altura se refiere a la elevación de los objetos sobre el nivel del suelo, por lo que los datos de suelo estarán en valores entorno a cero.

En el siguiente apartado se desarrolla el proceso de normalización y muestra su resultado directo: el modelo de normalización. Este modelo permite obtener los datos de elevaciones a la altura del suelo. Su objetivo es una aplicación específica, en este caso forestal. Aplicando este modelo a los datos LiDAR es posible obtener productos útiles para el análisis forestal: comparación de modelos de superficie con modelos de elevaciones, cálculo de biomasa...

5.2. PROCESO DE NORMALIZACIÓN

El proceso de normalización (ver figura 5.1) permite referir las alturas de los puntos al nivel del suelo en lugar de referirlos al nivel del mar. Para ello es necesario seguir el siguiente flujo de trabajo:

- Crear un Modelo Digital del Terreno en formato raster o un TIN (Triangulated Irregular Network), interpolando con el valor de suelo del atributo de clasificación.
- Extraer los valores de elevación mediante la herramienta Extract Values to Points. Esta herramienta permite restar la altura del suelo a la altitud sobre el nivel del mar, dejando los valores de elevación referidos a la altura sobre el suelo. Esto se refleja mediante la creación de un nuevo campo en el shapefile de puntos con el atributo de la altura.

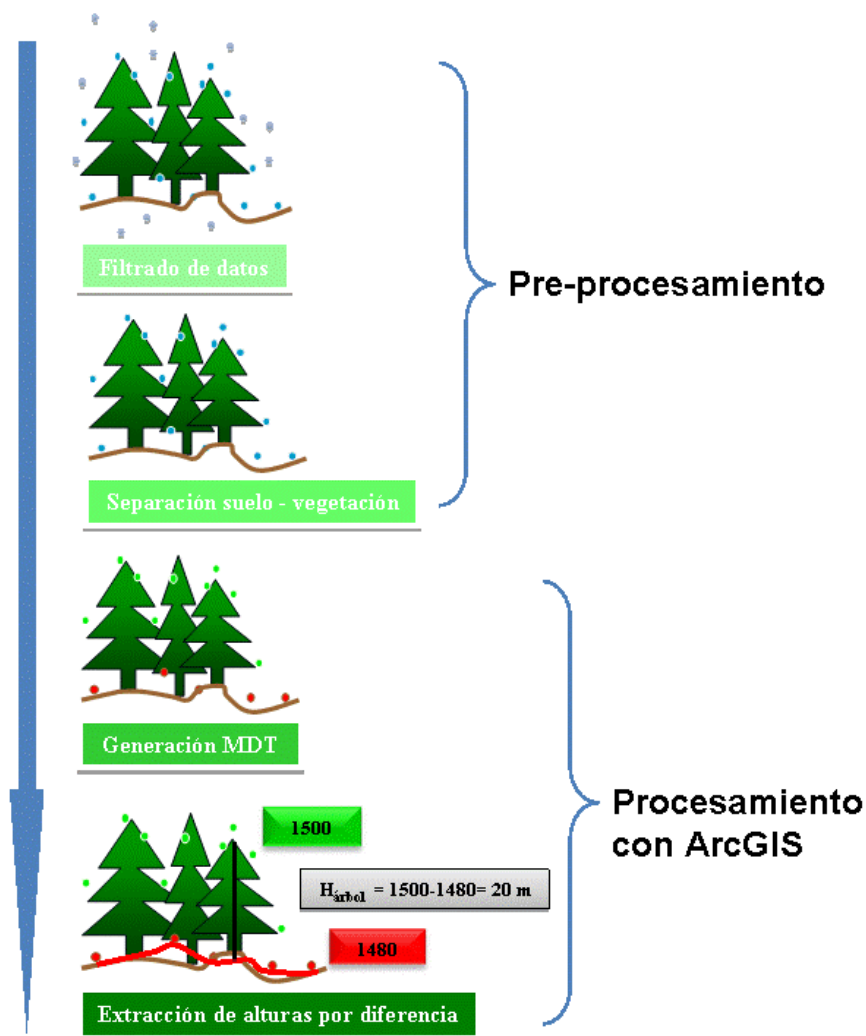


Figura 5.1. Esquema del proceso de normalización.

5.2.1. Herramientas del proceso de normalización

5.2.1.1. Selección de los puntos clasificados como suelo

Con la herramienta de selección por atributos (ver figura 5.2) es posible seleccionar todos aquellos puntos clasificados como suelo durante el pre-procesado. Según la clasificación de la ASPRS, las clases de suelo son 2 y 7.

Para realizar la selección es necesario transformar la entidad de puntos en una capa/layer .lyr.

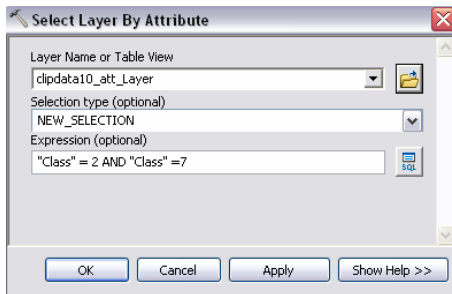


Figura 5.2. Herramienta de selección por atributos.

5.2.1.2. Interpolación. Inverse Distance Weighted (IDW)

Partiendo de la entidad de puntos seleccionados (puntos clasificados como suelo), esta herramienta (ver figura 5.3) permite interpolar una superficie usando la técnica de distancia inversa ponderada (IDW). Es necesario especificar el campo que contiene los atributos de elevación, así como el tamaño de celda del raster de salida y el radio de búsqueda de puntos vecinos para interpolar.

Esta herramienta permite generar un Modelo Digital del Terreno realizado exclusivamente con los puntos clasificados como suelo.

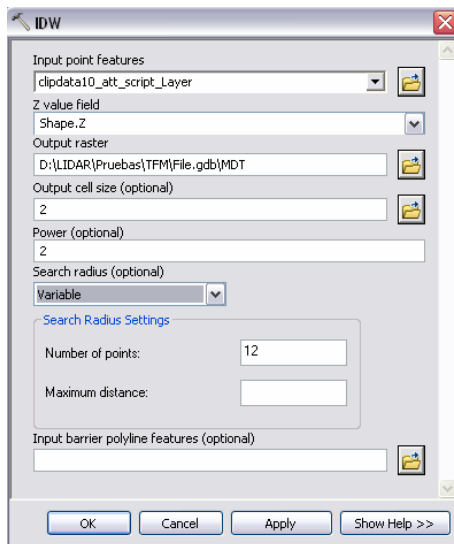


Figura 5.3. Herramienta de interpolación (IDW).

5.2.1.3. Extraer valores de elevación con la herramienta Extract Values to Points

Permite extraer los valores de elevación de las celdas del raster basadas en un conjunto de puntos (ver figura 5.4). El resultado es una entidad de puntos con los valores de elevación sobre el suelo en el campo rastervaluees.

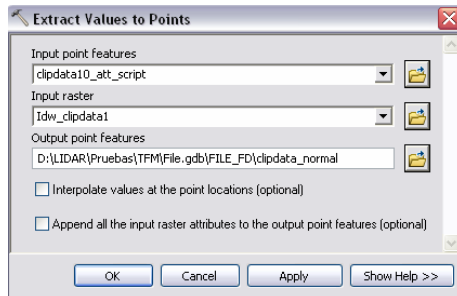


Figura 5.4. Herramienta Extract Values to Points.

5.2.1.4. Añadir un nuevo campo con la herramienta Add Field

A continuación hay que añadir un nuevo (ver figura 5.5) campo que permita calcular posteriormente la altura de los puntos sobre el suelo. Es fundamental especificar el tipo de campo generado para realizar cálculos precisos.

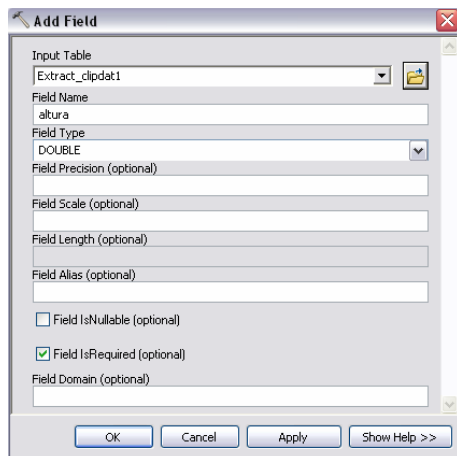


Figura 5.5. Herramienta para añadir un nuevo campo.

5.2.1.5. Calcular los valores para el campo recién creado con la herramienta Calculate Field

La expresión debe recoger la operación necesaria (ver figura 5.6) para mostrar los datos normalizados, es decir, restar al conjunto de puntos el valor de elevación del raster generado con los puntos a nivel de suelo (MDT).

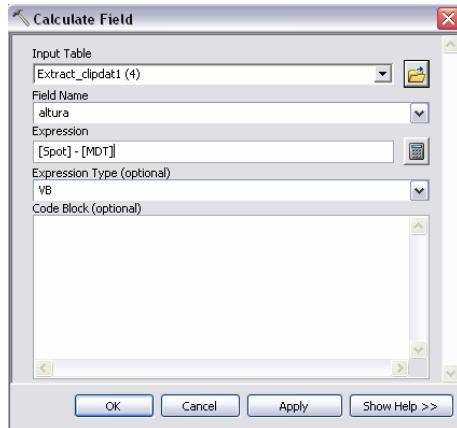


Figura 5.6. Herramienta para calcular atributos del nuevo campo.

El resultado (ver figura 5.7) es un campo con los datos de elevación normalizados, es decir, la altura sobre el suelo.

OBJECTID	SHAPE	Spot	Intensity	Return	NumReturns	Class	ScanAngle
1	Point Z	1,4141	25	1	0	0	15
2	Point Z	0,5151	29	2	0	0	15
3	Point Z	0,0451	104	1	0	0	2
4	Point Z	-0,1519	0	2	0	0	15
5	Point Z	-0,0999	2	2	0	0	15
6	Point Z	7,9371	33	1	0	0	15
7	Point Z	6,5231	33	1	0	0	15
8	Point Z	0,0131	9	2	0	0	15
9	Point Z	7,1171	9	1	0	0	15
10	Point Z	7,4611	7	1	0	0	15

Figura 5.7. Tabla con los datos de elevación normalizados.

5.2.2. Modelo de normalización

El modelo de geoprocésamiento para normalizar los datos LiDAR (ver figura 5.8) pasa por el modelo de carga de datos explicado en el apartado anterior. Una vez cargados los datos en una geodatabase como una entidad de puntos individuales con todos sus atributos es posible realizar el proceso de normalización. El flujo de trabajo es el siguiente:

- Crear una capa (layer) de la entidad de puntos.
- Seleccionar los puntos de la capa cuya clase sea suelo (los valores son 2 y 7, según la clasificación de la ASPRS).
- Crear un MDT o un TIN mediante la herramienta de interpolación (IDW).
- Crear una nueva entidad de puntos con los valores de elevación de cada punto y los valores de elevación calculados a nivel de suelo en el MDT.
- Calcular en un nuevo campo los valores de elevación normalizados (altura sobre el nivel del suelo), restando los valores del campo raster value a los valores de elevación sobre el nivel del mar del conjunto de puntos.

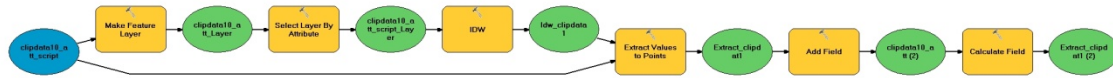


Figura 5.8. Modelo de normalización de datos LiDAR.

De este modo, y partiendo de una entidad de puntos con su atributo de elevación referido al nivel del mar, obtendremos un nuevo campo que nos permitirá trabajar con elevaciones sobre el nivel del suelo.

Una vez aplicado este modelo de normalización a los datos LiDAR es posible realizar análisis concretos referidos a determinadas entidades sobre la superficie terrestre. En este caso se trata de analizar la biomasa de la cubierta vegetal.

5.3. APLICACIÓN FORESTAL

5.3.1. Introducción

Uno de los proyectos del Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible se basa en la estimación de variables de interés forestal como el estudio de la biomasa o el volumen de madera en determinadas zonas forestales. Para ello es necesario realizar el cálculo de la biomasa y del volumen forestal mediante una serie de parámetros.

A grandes rasgos, la biomasa se centra en el diámetro normal de los troncos de los árboles, mientras que el volumen forestal se centra en la combinación del diámetro normal y de la altura de los árboles.

El estudio de la biomasa y del volumen forestal se basa en la comparación entre los datos obtenidos en campo en unas cuantas parcelas, que suponen el 1% de la superficie de la zona de estudio, y los datos LiDAR asociados a dichas parcelas. Para facilitar la comparación, tanto las mediciones de campo como la información extraída de los datos LiDAR se refieren a determinadas parcelas del área de estudio (ver figura 5.9). Estas parcelas seleccionadas de manera aleatoria recogen una muestra representativa del área de estudio y permiten una comparación más ágil y dinámica para ajustar datos de campo y datos LiDAR. Los ajustes consisten en obtener modelos de regresión que permitan predecir las variables forestales a partir de los datos LiDAR. Los datos LiDAR que se empleen en la elaboración de los modelos de regresión se podrán conocer en el 99% restante de la zona de estudio. En este 99% restante no se conocen las variables forestales a estudiar, pero gracias al modelo que se ajuste será posible estimarlas.

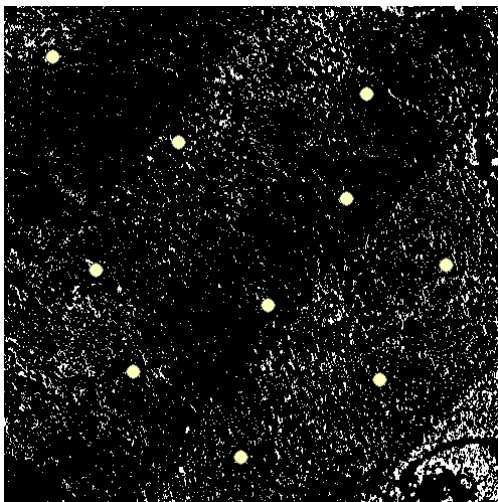


Figura 5.9. Distribución de parcelas en un área de estudio.

De este modo, la información derivada de los datos obtenidos con el trabajo de campo son variables dependientes, mientras que la información derivada de los datos LiDAR son variables independientes y/o auxiliares.

El Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible extrae las variables independientes, es decir, las extraídas de la información LiDAR, mediante el software FUSION. Este software permite extraer la altura máxima, mínima, media, la desviación estándar, los percentiles, los cuantiles...

A continuación, estas variables auxiliares se introducen en un software estadístico, en este caso Statgraphics, y se comparan con la biomasa total obtenida con los datos de campo (variables dependientes).

El software Statgraphics realiza procesos de comparación entre los datos obtenidos con las mediciones de campo y los datos LiDAR extraídos con el software FUSION. Esta comparación permite extraer la siguiente información:

- Realizar una serie de cálculos para determinar cuáles son las variables independientes o auxiliares óptimas para aplicarlas en un modelo de predicción.
- Realizar el modelo de predicción para estimar la biomasa del área de estudio, es decir, para extrapolar los datos obtenidos durante la comparación de los datos de campo y los datos LiDAR a zonas del área de estudio en las que no hay datos de campo. Esto nos permite elaborar el producto final: el mapa de estimación de biomasa forestal (ver figura 5.10).
- Conocer el margen de error de los datos LiDAR con respecto a los datos más precisos tomados sobre el terreno, para aquellas zonas donde existen las dos fuentes de datos.

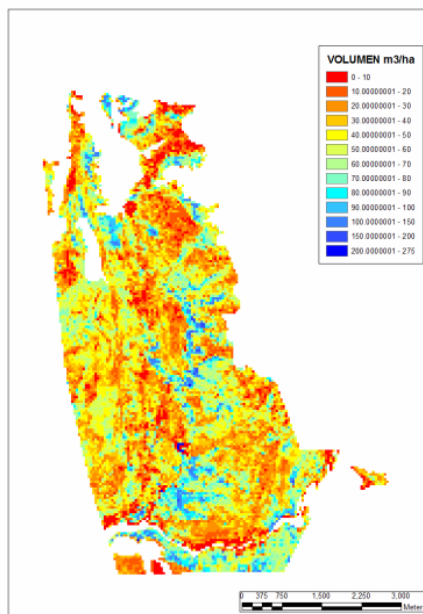


Figura 5.10. Mapa de de estimación de biomasa de un área forestal.

Toda esta información aplicada a las parcelas, tanto variables dependientes (trabajo de campo) como independientes/auxiliares (datos LiDAR), permite comparar entre lo observado (variables) y lo predicho (modelo de predicción).

Esta comparación asegura que el modelo de predicción es correcto. Este modelo de predicción se basa en un modelo de regresión múltiple que sigue los siguientes pasos:

- Modelo.
- Estimación.
- Propiedades de los estimadores.
- Contraste de regresión.
- Correlación.
- Predicción.

Mediante la aplicación de cinco condiciones se comprueba el último paso, que conforma el modelo de predicción y se verifica su hipótesis:

- Su esperanza es cero.
- Su varianza es constante.
- Las perturbaciones son independientes entre sí.
- Su distribución es normal.
- El número de datos disponibles es mayor que $k+1$.
- Ninguna de las variables explicativas es una combinación lineal exacta de las demás.

Estas condiciones son las establecidas para realizar estudios de regresión y diseños de experimentos. De este modo se ajusta el modelo de predicción a las variables observadas (dependientes e independientes). Esto se hace obteniendo la diferencia de error (R^2) aplicando el modelo con datos auxiliares (datos LiDAR) y sin ellos mediante el uso del software Statgraphics. Cuanto menor sea la diferencia entre estos dos errores, más preciso será el modelo de predicción.

El cálculo de la diferencia de error es muy importante, ya que permitirá conocer, cuando menos de forma aproximada, intervalos de confianza para las predicciones que se hagan con el modelo.

Con los errores absolutos del modelo ajustado y la función de estimación del error es posible elaborar el mapa de predicciones y el mapa de estimaciones de error, como muestra la siguiente figura:

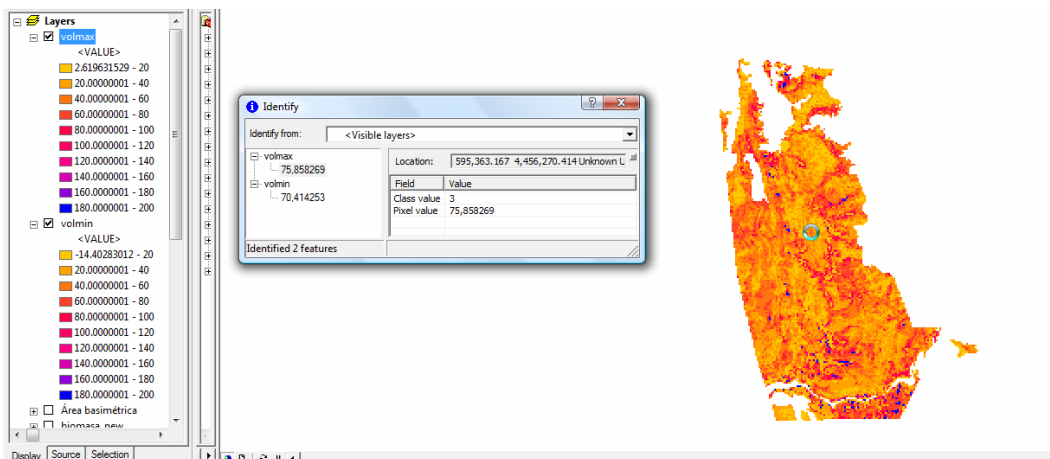


Figura 5.11. Mapa de estimaciones de error.

5.3.2. Obtención de variables forestales

Para analizar la biomasa y el volumen forestal se seleccionan una serie de parámetros para las variables dependientes y otros para las variables independientes.

La combinación de ambas a través del software Statgraphics da como resultado una función que se presenta como un modelo de predicción. Este modelo es el que se aplica al área de estudio completa, y con el que se estima la biomasa y el índice de error de esa predicción.

5.3.2.1. Variables independientes/auxiliares

Las variables independientes de las parcelas se calculan mediante operaciones realizadas directamente sobre las tablas de atributos de los datos LiDAR cargados en ArcGIS (en formato shapefile) y normalizados (valores de elevación referidos al nivel del suelo).

Una vez cargados y normalizados los datos, se aplica la herramienta Summary Statistics (ver figura 5.12), localizada dentro de las herramientas de análisis. Esta herramienta permite conocer las siguientes variables:

- Número de puntos total dentro de la parcela.
- Sumatorio de la altura.
- Altura media.
- Altura mínima.
- Altura máxima.
- Rango de alturas.
- Desviación estándar de la altura.

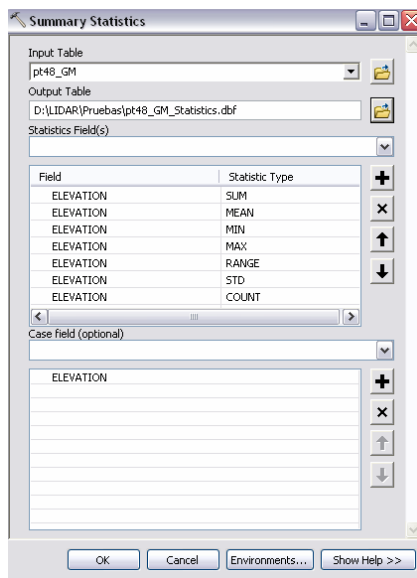


Figura 5.12. Herramienta Summary Statistics.

Es muy importante realizar estas estadísticas solo para las parcelas de las que hay datos de campo de campo disponibles, de este modo se podrá realizar la comparación entre datos LiDAR y datos de campo. Para ello es necesario seleccionar el campo por el que se agrupan las estadísticas, es decir, el número de parcela.

5.3.2.2. Variables dependientes

Las variables independientes del área de estudio son las que se obtienen a través del trabajo de campo realizado sobre las parcelas. El resultado de estos datos es un valor que determina el índice total de biomasa para cada una de las parcelas del área de estudio.

Al tratarse de un dato obtenido a través del trabajo de campo (ver figura 5.13) y calculado por el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible, no se recoge en este trabajo el proceso para su obtención. En su lugar, se aplican directamente los valores de biomasa finales calculados para las parcelas de las que se disponen datos de las variables dependientes medidas en el trabajo de campo.



Figura 5.13. Medición de variables dependientes.

5.3.2.3. Comparación de variables

La comparación de variables se hace a través del software estadístico Statgraphics. Para este paso es fundamental el uso de software fuera del entorno de ArcGIS, ya que el software de ESRI no es una herramienta estadística tan potente como Statgraphics para llevar a cabo ese tipo de operaciones.

Statgraphics realiza una serie de cálculos en los que se incluyen todas las variables, tanto de de campo como las obtenidas con los datos LiDAR. A partir de las variables, el software obtiene como resultado una función que se aplica como modelo de predicción que se aplica en primer lugar a las parcelas y a continuación, extrapolando a toda el área de estudio.

Tras ajustar el modelo de predicción, Statgraphics calcula el coeficiente R^2 . Este coeficiente se calcula aplicando el modelo a las parcelas y muestra el cociente entre los errores de las predicciones hechas con datos auxiliares (datos LiDAR) y sin ellos (solo datos de campo). Estos últimos son los errores que se esperarían para un inventario clásico en el que no hubiese información auxiliar.

Cuanto menor sea el término R^2 , más preciso será el modelo de predicción, ya que quiere decir que el modelo se ajusta usando tanto los datos de campo y los datos LiDAR como usando solo los datos de campo.

Como se ha explicado anteriormente, el cálculo de la diferencia de error es muy importante, ya que permite que el modelo de predicción sea mucho más preciso y que se ajuste a los datos del área de estudio.

5.3.3. Modelos de estimación de la biomasa

El geoprocésamiento forestal comprende dos modelos:

- El primero aplicado a las parcelas para calcular su biomasa, recogiendo los datos de las variables descritas anteriormente junto con el modelo de predicción
- El segundo aplicado a toda el área de estudio para estimar su biomasa, lo que permite generar el mapa final.

5.3.3.1. Modelo aplicado a las parcelas

Partiendo de los datos LiDAR cargados en ArcGIS y normalizados, el flujo de trabajo del modelo (ver figura 5.14) es el siguiente:

- Hacer un recorte de las parcelas del área de estudio mediante la herramienta Clip.
- Agregar el atributo parcela a la nube de puntos mediante la herramienta Intersect.
- Obtención de las variables independientes (ver tabla 5.1) para cada una de las parcelas mediante la herramienta Summary Statistics.

NÚMERO DE PARCELA	Nº DE PUNTOS	SUMATORIO ALTURA	ALTURA MEDIA	ALTURA MÍNIMA	ALTURA MÁXIMA	RANGO DE ALTURAS	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE ALTURAS
1							
2							
3							
...							

Tabla 5.1. Variables estadísticas calculadas a partir del atributo de altura.

- Añadir una capa de evento con los datos de biomasa de las parcelas (georreferenciados) obtenidos con las mediciones de campo y unirla a la tabla de las variables estadísticas de las parcelas. Se realiza mediante las herramientas Make XY Event Layer y Join Field.
- Crear un nuevo campo en la tabla (ver tabla 5.2) y calcular sus valores aplicando el modelo de predicción. Este modelo de predicción usará las variables estadísticas de la altura relacionándolas entre sí. Para ello se usarán las herramientas Add Field y Calculate Field.

NÚMERO DE PARCELA	BIOMASA CAMPO	BIOMASA LIDAR
1		
2		
3		
...		

Tabla 5.2. Comparación de resultados de estimación de biomasa.



Figura 5.14. Modelo de estimación de biomasa aplicado a las parcelas.

5.3.3.2. Modelo aplicado al área de estudio

Una vez aplicado el modelo de predicción a las parcelas y calculado el error entre los datos de campo y los datos LiDAR, los resultados se aplican al conjunto de datos del área de estudio. El flujo de trabajo del modelo (ver figura 5.17) es el siguiente:

- Crear una malla de celdas mediante la herramienta Fishnet (ver figura 5.15) de tamaño de píxel igual al diámetro de las parcelas.

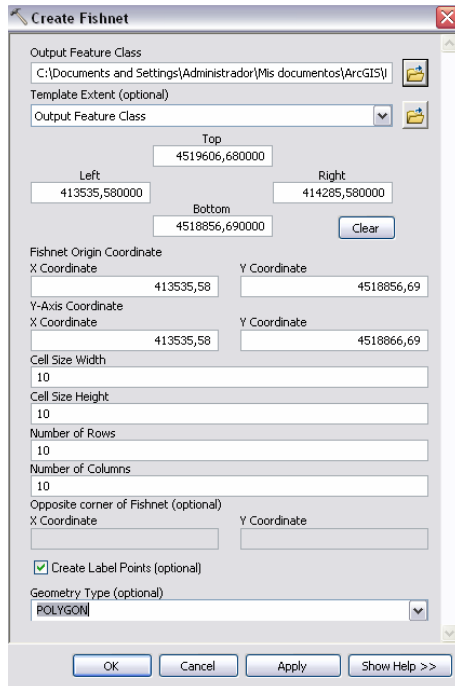


Figura 5.15. Herramientas Create Fishnet.

- Agregar el atributo celda a la nube de puntos mediante la herramienta Intersect (ver figura 5.16).

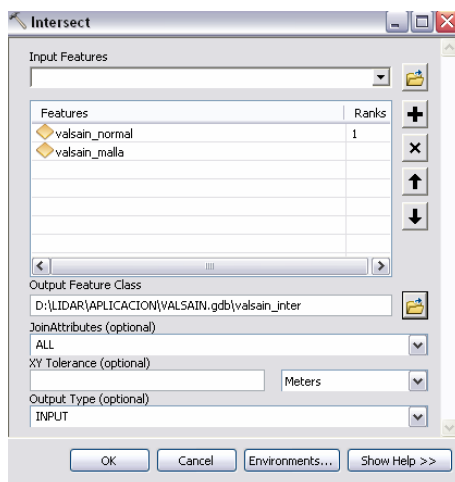


Figura 5.16. Herramienta Intersect.

- Calcular las variables estadísticas del atributo de altura mediante la herramienta Summary Statistics aplicada a cada celda de la malla.

- Una vez calculadas las variables, se añade un campo para el modelo de predicción con la herramienta Add Field.
- A continuación se calculan los valores de este campo con la herramienta Calculate Field, aplicando el modelo de predicción.

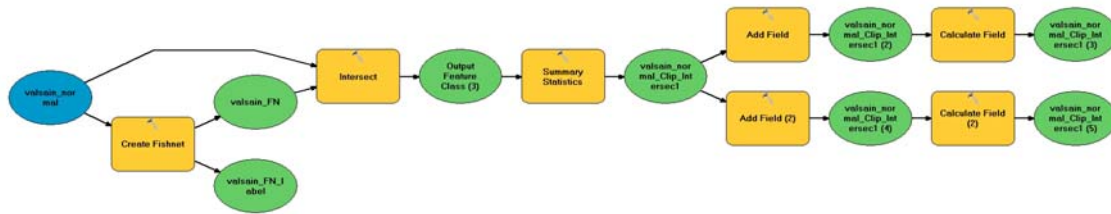


Figura 5.17. Modelo de estimación de biomasa aplicado al área de estudio.

Una vez calculados los valores, es posible realizar el mapa partiendo de la información de la tabla con los valores de predicción de biomasa. La simbología debe mostrar claramente las diferencias de valores.

5.4. APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO

En este apartado se va a presentar un caso de estudio en el que se desarrollará la metodología de análisis propuesta en el apartado del desarrollo de la investigación.

Tanto los datos LiDAR como los datos y los cálculos realizados con el trabajo de campo han sido proporcionados por el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible.

El área de estudio seleccionada es una zona de estudio del pinar de Valsaín, localizado en el municipio de San Ildefonso o La Granja, en la provincia de Segovia. Se trata de un área forestal de 303,356 Ha (3,03356 km²). Sus coordenadas geográficas en el centro del área de estudio son 4° 1' 42,525" Oeste y 40° 48' 56,124" Norte. La siguiente figura muestra dos mapas de localización:



Figura 5.18. Zona de estudio (izquierda) y detalle del MTN25 (derecha).

A continuación se muestra la aplicación del procedimiento propuesto en este trabajo y sus resultados correspondientes.

5.4.1. Carga de datos

Para establecer el espacio de trabajo nos basamos en la aplicación del modelo de creación de geodatabases (ver figura 5.19). Para este caso se ha optado por crear una geodatabase de archivo (.gdb), que tiene mayor capacidad de almacenamiento (de 1TB a 256TB).

El modelo comprende también la creación de un conjunto de entidades (Feature Dataset). Uno de los parámetros a establecer es el sistema de coordenadas; para este caso se ha elegido el sistema de coordenadas geográfico WGS 1984 UTM Zona 30 Norte.



Figura 5.19. Modelo de creación del espacio de trabajo.

A continuación se procede a cargar los datos en la geodatabase, aplicando el modelo de carga de datos. Se ha seleccionado la opción de utilizar la herramienta LAS to Multipoint y ejecutando el script de ESRI Support ExplodeLASMultipoint, mostrado en la siguiente figura:

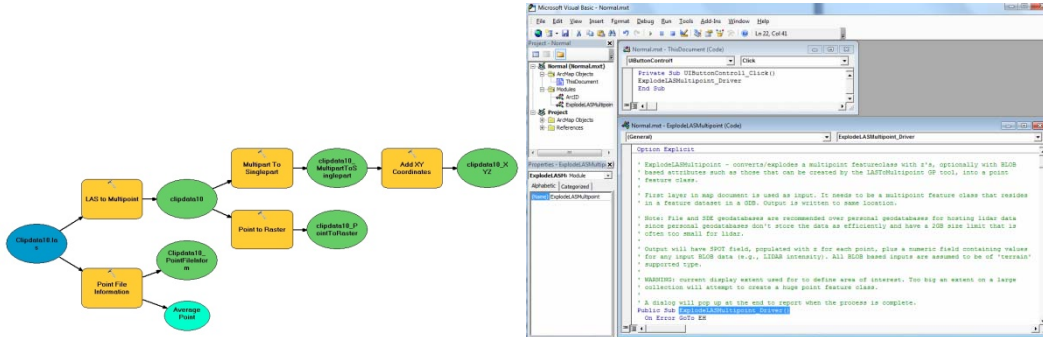


Figura 5.20. Combinación del modelo de carga de datos con el script ExplodeLASMultipoint.

Este modelo importa los archivos .las, convirtiéndolos en shapefiles, transformándolos en entidades de puntos y mostrando sus atributos. Del mismo modo calcula las coordenadas de latitud y longitud para cada uno de los puntos.

La entidad de multipuntos (ver figura 5.21) presenta la nube de puntos agrupada en clústers, por lo que el número total de entidades es de 2.111, mientras que el número total de puntos individualizados (ver figura 5.22) es de 7.127.699. Así mismo los atributos en formato binario de la entidad de multipuntos se extraen para ser representados en la entidad de puntos.

OID*	Shape*	Intensity	ScanAngle	Return	NumReturns	GpsTime	Class	PointCount
1	Multipoint Z	Blob	Blob	Blob	Blob	Blob	Blob	1698
2	Multipoint Z	Blob	Blob	Blob	Blob	Blob	Blob	1691
3	Multipoint Z	Blob	Blob	Blob	Blob	Blob	Blob	1677
4	Multipoint Z	Blob	Blob	Blob	Blob	Blob	Blob	1614

Figura 5.21. Muestra de la tabla de la entidad de multipuntos.

OBJECTID*	SHAPE*	Spot	Intensity	ScanAngle	Return	NumReturns	GpsTime	Class
1	Point Z	1363,0399999999999	0	-14	3	4	227522,280972568	4
2	Point Z	1361,11	52	-14	2	3	227522,280990762	4
3	Point Z	1366,2899999999999	6	-14	1	3	227522,281008913	4
4	Point Z	1366,2	2	-15	1	3	227522,281027107	4

Figura 5.22. Muestra de la tabla de la entidad de puntos.

La herramienta Point File Information muestra el rango de valores de elevación entre 1.300,39 y 1.606,14 metros para el conjunto de datos. Así mismo, el valor de distancia media entre puntos es de 64,8429 centímetros.

5.4.2. Normalización

El proceso de normalización (ver figura 5.23) de datos permite referir las alturas del conjunto de datos al nivel del suelo mediante la ejecución del modelo.



Figura 5.23. Modelo de normalización.

Partiendo de todo el conjunto de datos cargados en ArcGIS, el modelo de normalización realiza las operaciones necesarias para añadir un nuevo campo a la tabla de la nube de puntos con los datos de elevación normalizados.

Para llevar a cabo este proceso, el modelo selecciona los puntos clasificados como suelo, en este caso son 2.522.982 puntos seleccionados como suelo (clase 2).

A continuación crea un MDT en formato raster con los valores de elevación sobre el nivel del mar, como se puede observar en la siguiente figura:

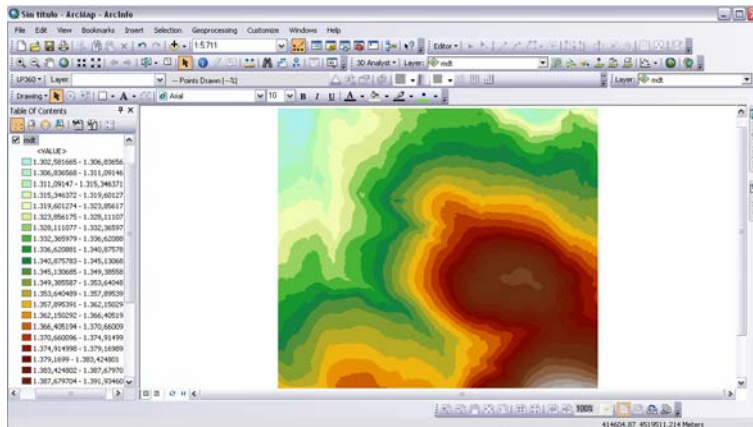


Figura 5.24. MDT de los puntos clasificados como suelo.

Por último extrae los valores de elevación y se los resta a los valores de la nube de puntos, dando como resultado un campo con los valores de elevación referidos al nivel del suelo (ALTURA), como se muestra en la siguiente figura:

OBJECTID	SHAPE	Spot	Intensity	ScanAngle	Return	IlumReturns	Class	GpsTime	POINT X	POINT Y	POINT Z	RASTERVALU	ALTURA
109403	Point Z	1324,24	78	-10	1	1	2	227707,834417	414229,27	4519597,27	1324,24	1322,470947	1,769053
690138	Point Z	1324,24	78	-10	1	1	2	227707,834417	414229,27	4519597,27	1324,24	1322,470947	1,769053
107961	Point Z	1329,88	164	-11	1	1	2	227707,684463	414252,11	4519598,94	1329,88	1328,472046	1,407954
689738	Point Z	1329,88	164	-11	1	1	2	227707,684463	414252,11	4519598,94	1329,88	1328,472046	1,407954

Figura 5.25. Muestra de la tabla con los valores de elevación normalizados.

5.4.3. Análisis forestal

El análisis forestal comprende dos modelos: uno aplicado a las parcelas y otro aplicado a todo el conjunto de datos que conforman el área de estudio.

Ambos realizan básicamente las mismas operaciones, aunque los resultados son diferentes en función de los datos con los que trabaje.

5.4.3.1. Parcelas

El análisis forestal aplicado a las parcelas (ver figura 5.26) realiza los cálculos estadísticos de las parcelas para compararlos con los datos obtenidos en el trabajo de campo.



Figura 5.26. Modelo de análisis forestal aplicado a las parcelas.

En primer lugar extrae los datos LiDAR de las parcelas (ver figura 5.27), calcula las variables estadísticas del atributo de elevación y añade un campo para calcular el modelo de predicción.

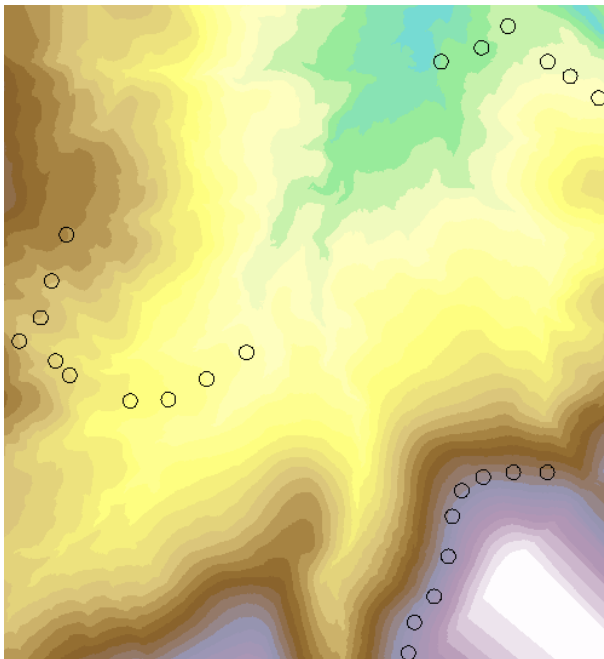


Figura 5.27. Muestra de la distribución de las parcelas del área de estudio.

A continuación carga los datos de biomasa de las parcelas calculados en el trabajo de campo, los une a la tabla de las parcelas y calcula el modelo de predicción de biomasa.

5.4.3.2. Área de estudio

El análisis forestal del área de estudio (ver figura 5.28) extrapola los valores obtenidos con el modelo anterior aplicados al área de estudio.

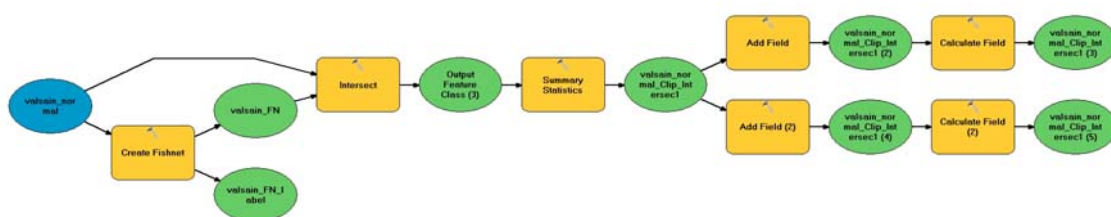


Figura 5.28. Modelo de análisis forestal aplicado al área de estudio.

En primer lugar crea una malla con tamaño de celda igual al tamaño de las parcelas. En este caso se trata de una malla de 2.303 celdas de 35,45 x 35,45 metros (1256,7 m²) cada una. Estas celdas se cruzan con la nube de puntos mediante un recorte de la entidad de puntos.

A continuación se calculan las variables estadísticas del atributo de elevación para cada celda de la malla.

Finalmente se añaden dos nuevos campos en los que se aplican los modelos de predicción, tanto el de volumen forestal como el de biomasa, realizados por el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible mediante el software Statgraphics.

En este caso, los modelos de predicción aplicados son los siguientes:

- Volumen (m³/ha) = -286.1671564561 + 60.5713592113 * MEAN_ALTURA
- Biomasa (Kg/ha) = 16646,04250884 + 3014,86872173 * MEAN_ALTURA + -1007,84640200 * MAX_ALTURA.

A continuación se muestran las gráficas de regresión de los modelos de predicción, tanto del volumen forestal como de la biomasa forestal (ver figura 5.29), así como una muestra de la tabla de los datos del volumen forestal y la estimación de biomasa forestal (ver figura 5.30):

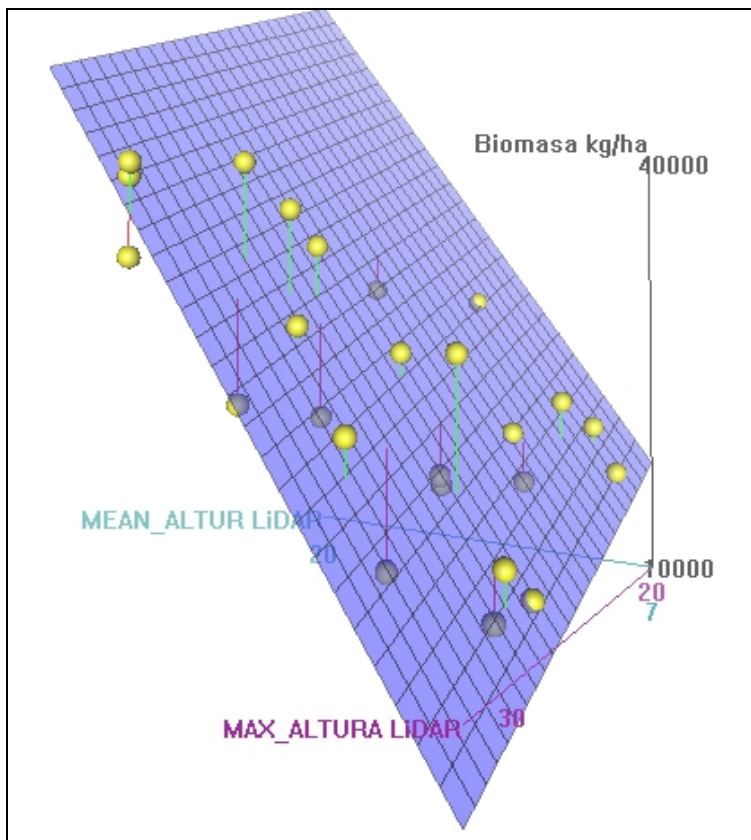
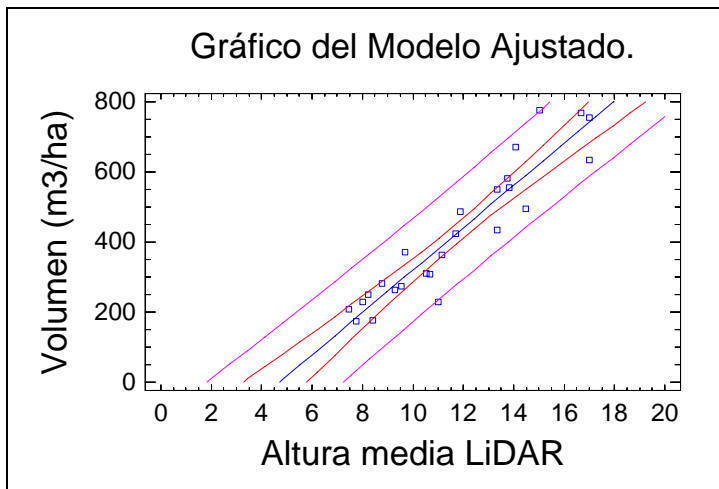


Figura 5.29. Gráficos de regresión de los modelos de predicción.

Table

Biomasa (Kg/ha)

FID	Shape	OBJECTID	FID malla valsain	FREQUENCY	MEAN ALTURA	MAX ALTURA	BIOMASA	VOLUMEN
9	Polygon	1	9	2845	7,769441	20,508892	19400,075252	184,438459
10	Polygon	2	10	7662	7,880464	22,914365	17310,447781	191,163287
11	Polygon	3	11	2715	9,232867	22,56896	21735,878002	273,08012
12	Polygon	4	12	2532	9,943399	22,41437	24033,841961	316,118018
13	Polygon	5	13	2402	8,982524	20,140537	23428,605977	257,916545
14	Polygon	6	14	2466	8,509041	19,901694	22241,832804	229,237018
15	Polygon	7	15	2549	7,555011	18,853247	20422,231123	171,450118

(0 out of 2155 Selected)

Biomasa (Kg/ha) Volumen (m3/ha)

Figura 5.30. Tabla con los datos de volumen forestal y de estimación de biomasa.

5.4.4. El mapa de volumen forestal y de estimación de biomasa

El resultado final de todo este proceso de análisis forestal es el mapa de volumen forestal (ver figura 5.31) y el mapa de estimación de biomasa (ver figura 5.32). Estos se representan a través de los atributos volumen y de biomasa calculados con el modelo de predicción en el último análisis.

Como el área de estudio está dividida en celdas, su simbolización se realiza a través del número de celda. En este caso, se ha llevado a cabo una unión de la tabla de atributos de la malla con la tabla que contiene las estadísticas calculadas con la herramienta Summary Statistics.

Es importante marcar la opción de mantener solo los registros coincidentes, ya que la malla cubre una zona mayor que la cubierta por los datos LiDAR, por lo que hay celdas de la malla sin información.

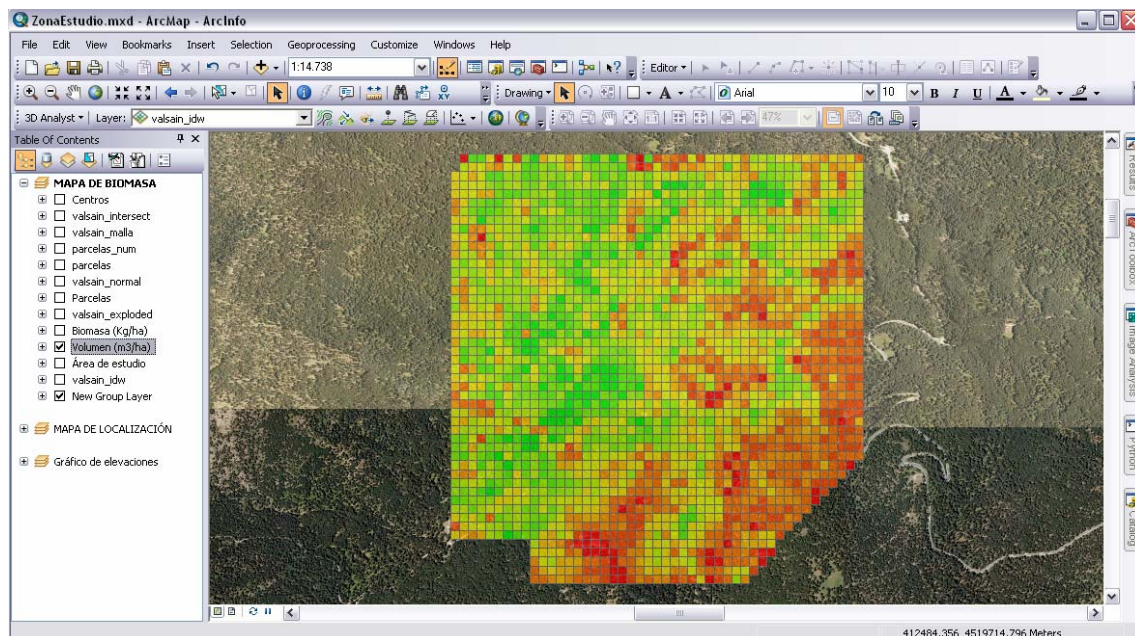


Figura 5.31. Volumen forestal en la zona de estudio.

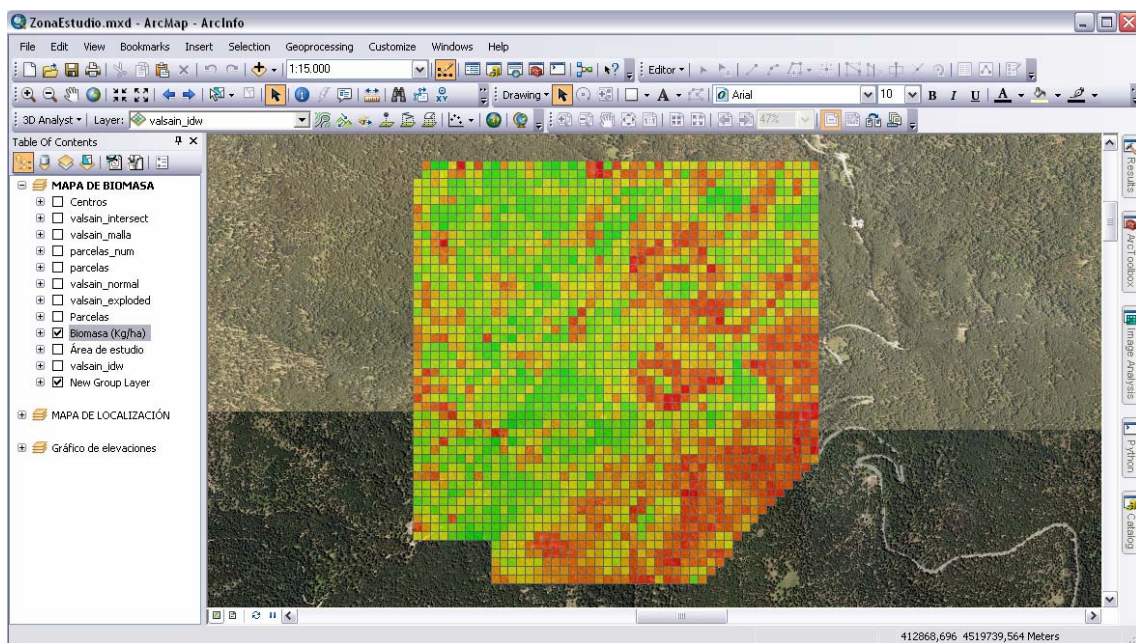


Figura 5.32. Estimación de biomasa en la zona de estudio.

PARTE IV
Conclusiones

Capítulo 6

Conclusiones del trabajo

Este capítulo recoge las conclusiones extraídas de la investigación llevada a cabo en el presente trabajo.

6.1. VERIFICACIÓN, CONTRASTE Y EVALUACIÓN DE LOS OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es elaborar un proceso y una metodología que permitan realizar análisis forestales con datos LiDAR en el entorno de ArcGIS 10. El planteamiento inicial se ha cumplido satisfactoriamente, cubriendo paso a paso la estructura del trabajo.

Partiendo del estudio de los inicios del LiDAR, su evolución y su situación actual, se ha llegado a presentar un breve resumen de sus aplicaciones presentes y futuras.

A continuación se ha presentado una aproximación al software existente para el tratamiento y el análisis de los datos LiDAR. En este apartado ha sido necesario ajustar el contenido, ya que, hasta la fecha siguen apareciendo programas, aplicaciones, metodologías y procedimientos para trabajar con información LiDAR.

Finalmente, el desarrollo de la investigación ha cubierto correctamente las necesidades planteadas en la hipótesis inicial, llegando a superar las expectativas en determinados puntos.

Este trabajo se presenta como precedente y modelo de desarrollo para futuras aplicaciones orientadas al tratamiento de datos LiDAR en ArcGIS, así como una guía orientativa en la introducción de los datos LiDAR.

6.2. SÍNTESIS DEL MODELO PROPUESTO

La metodología empleada se basa en el uso de Model Builder para generar procesos automáticos que permitan hacer del tratamiento de los datos LiDAR una tarea ágil y simple.

La organización del modelo de desarrollo propuesto abarca los siguientes puntos concretos:

- Creación de un espacio de trabajo: genera automáticamente el espacio de trabajo donde se almacenarán, tratarán y analizarán los datos LiDAR.
- Carga de datos LiDAR: el procedimiento muestra cómo cargar los datos en el espacio de trabajo, transformando los archivos .las en clases de entidad de una geodatabase compatible con el formato shapefile. A continuación implementa el script para extraer la información de la nube de puntos almacenada en formato binario.
- Normalización de los datos: una vez cargado los datos con todos sus atributos, se aplica este modelo que permite referir los datos de elevación al nivel del suelo.
- Análisis forestal: el modelo permite calcular y analizar una serie de variables combinadas con un modelo de predicción para generar un mapa de estimación de biomasa en una zona forestal.

6.3. APORTACIONES ORIGINALES

Entre las aportaciones originales destaca la creación de un botón en ArcMap mediante un script importado al editor de Visual Basic. El botón permite ejecutar el script ExplodeLASMultipoint, que separa las entidades multipuntos en entidades de punto almacenadas en un shapefile. Estas entidades de punto recogen todos los atributos de los archivos .las que se almacenan en formato binario en la entidad de multipuntos. De este modo, el botón se convierte en el paso fundamental del planteamiento de este trabajo: manejar y analizar datos LiDAR con ArcGIS.

Otra de las ventajas es la implementación de un modelo que permite realizar el proceso de cálculo de variables independientes (datos LiDAR) desde ArcGIS. El objetivo ha sido sustituir el uso del software FUSION para calcular variables relacionadas con la elevación por un modelo de Model Builder en ArcGIS. Esto está incluido en el modelo de geoprocesamiento forestal.

Aunque menos original, cabe destacar el modelo de normalización. Una vez establecidos los parámetros, realiza de forma automática la normalización de los datos LiDAR.

6.4. TRABAJOS DERIVADOS

Exposición de mapas de la Conferencia Europea ESRI 2011.

Título: *Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10.*

El trabajo presentado es un póster que recoge los siguientes aspectos:

- Breve explicación del proyecto, donde se resumen los objetivos y la metodología del mismo.
- Modelos de procedimiento y análisis, mostrando los pasos del proceso y explicando brevemente su desarrollo.
- Resultados obtenidos de la aplicación de los modelos al caso de Valsáin (Segovia): mapa de estimación de la biomasa forestal.

II Premio ESRI al mejor proyecto final de carrera

Título: *Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10.*

El trabajo consiste en una presentación en inglés que resume el presente trabajo:

- Introducción.
- Desarrollo y evolución de los datos LiDAR.
- Aproximación al software existente para el tratamiento de datos LiDAR.
- Tratamiento de los datos LiDAR en ArcGIS 10.
- Aplicaciones forestales con datos LiDAR.
- Conclusiones.

6.5. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Las líneas de investigación futuras se centran en el desarrollo de aplicaciones orientadas al uso de ArcGIS para el tratamiento de datos LiDAR.

Tanto la aplicación forestal, abordada brevemente en este trabajo, como cualquier otra aplicación del uso de datos LiDAR puede beneficiarse de este trabajo, ya que los modelos iniciales son comunes para cualquier análisis LiDAR y la aplicación forestal puede aprovecharse para otro tipo de estudios.

Del mismo modo, quedan abiertas muchas puertas en lo relativo al desarrollo de aplicaciones, así como la implementación de herramientas específicas para el tratamiento y el análisis de datos LiDAR en el entorno de ArcGIS.

La tecnología LiDAR se encuentra en auge y su potencial es muy elevado, por lo que sus aplicaciones y su desarrollo futuro dependen del estudio de las necesidades actuales.

BIBLIOGRAFÍA

Esta sección recoge toda la bibliografía consultada a la que hace referencia el contenido de este trabajo.

La bibliografía consultada se ha clasificado en cinco categorías: fundamentos de la tecnología LiDAR, software para su tratamiento, trabajos, aplicaciones y bibliografía general (programación y estadística). Por último se incluye un sexto apartado con las referencias en Internet.

A. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA LIDAR:

- **LIDAR 101: An Introduction to LiDAR Technology, Data and Applications.** Digital Coast (Coastal Remote Sensing Program). 2008. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
http://www.csc.noaa.gov/digitalcoast/data/coastallidar/_pdf/What_is_Lidar.pdf
- **LAS SPECIFICATIONS VERSION 1.3.** The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). 2010.
http://www.asprs.org/publications/pers/2009journal/september/LAS_Spec_V1.3-R10.pdf
- **LIDAR Guidebook: concepts, project design and practical applications.** Brian R. Raber, James Cannistra. 2005. URISA, Sanborn.
http://www.urisa.org/files/publications/lidar_guidebook/lidar_guidebook.pdf
- **LIDAR and Digital Elevation Data.** North Carolina Cooperating Technical State. 2003. Floodplain Mapping Program.
http://www.ncfloodmaps.com/pubdocs/lidar_final_jan03.pdf
- **National Considerations for LIDAR Standards and Specifications.** H. Karl Heidemann. 2009. Center for LiDAR Information Coordination and Knowledge (CLICK), United States Geological Survey (USGS).
http://lidar.cr.usgs.gov/downloadfile.php?file=ASPRS_Lidar_Standards_Specs.ppt
- **Fundamentos del LIDAR y análisis de datos LIDAR con DielmoOpenLIDAR.** J. C. García. 2009. Universidad de Girona.
<http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/10256/1413/1/C17.pdf>

B. SOFTWARE PARA EL TRATAMIENTO DE DATOS LIDAR:

- **The LIDAR Analyst Extension for ArcGIS.** Automated Feature Extraction Software for Airborne LIDAR Datasets. White Paper. 2005. Visual Learning Systems.
http://www.featureanalyst.com/lidar_analyst/publications/LA_whitepaper.pdf
- **LIDAR Analysis in ArcGIS 10 for Forestry Applications.** ESRI White Paper. 2011. ESRI. <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/lidar-analysis-forestry-10.pdf>
- **LIDAR Mapping.** Terrapoint White Paper. 2008. Ambercore.
<http://www.ambercore.com/files/TerrapointWhitePaper.pdf>
- **FUSION/LDV: software for LiDAR Data Analisis and Visualization.** FUSION v. 2.90. Robert J. McGaughey. 2010.
http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf

C. TRABAJOS CON DATOS LIDAR:

- **Algoritmo para la localización y estimación de masa forestal a partir de imágenes LIDAR.** M^a Pilar Palomino Palomino. 2010. Trabajo de Fin de Master de Investigación en Sistemas Inteligentes, Facultad de Informática, UCM.
http://eprints.ucm.es/9912/1/Alg_localizacion_estimacion_masa_forestal_lidar.pdf
- **Design, Development and Application of LiDAR Data Processing Tools.** Sara E. Ehinger. 2010. Master of Science in Geographic Information Science. Idaho State University. http://bcal.geology.isu.edu/docs/Ehinger_thesis_0629_Final.pdf
- **Aplicación de la tecnología LIDAR al estudio de la cubierta vegetal.** M. Coromines Munt, E. Blanco Casellas y A. Ruíz García. 2005. Centro Tecnológico Forestal de Cataluña e Instituto Cartográfico de Catalunya.
http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=2981951&orden=0
- **Distribución de datos LIDAR en la IDERM.** J.C. García y Oscar García. 2009. DIELMO 3D S.L.
http://www.ideo.es/resources/presentaciones/GTIDEE_Murcia_2009/ARTICULOS_JIDEE2009/Articulo-64.pdf
- **Filtrado de datos LIDAR Mediante GRASS GIS.** Roberto Antolín Sánchez. Maria Antonia Brovelli. Politecnico di Milano (DIIAR). Jornadas de SIG Libre, Girona, 2007. <http://www.sigte.udg.es/jornadassiglibre2007/comun/present/2.4.pdf>
- **Obtención de DTM y DSM mediante tecnología LIDAR. Aplicación al río Ebro.** Alfonso Gómez, Jorge Delgado, Núria Pérez. 2005. Universidad Politécnica de Madrid y Universidad de Jaén.
<http://www.ingegraf.es/pdf/titulos/COMUNICACIONES%20ACEPTADAS/T14.pdf>
- **Software para la gestión de un proyecto de datos LIDAR en un Sistema de Información Geográfica.** Daniel López Sánchez. Proyecto de Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad Politécnica de Valencia. 2010.
http://dspace.upv.es/xmlui/bitstream/handle/10251/10195/PFC_Daniel_Lopez_Sanchez_DISCA-108.pdf?sequence=1
- **LIDAR Solutions in ArcGIS.** Clayton Crawford. ESRI International User Conference. 2010. http://proceedings.esri.com/dvd/uc/2010/uc-index/uc/workshops/tw_604.pdf

- **Ajuste planimétrico de datos LIDAR para la estimación de características dasométricas en el parque natural del Alto Tajo.** Mariano García, David Riaño, Elena Prado, Emilio Chuvieco y Mark Danson. 2009. GeoFocus número 9. http://geofocus.rediris.es/2009/Articulo9_2009.pdf
- **Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data.** Hans-Erik Andersen (College of Forest Resources, University of Washington), Robert J. McGaughey y Stephen E. Reutebuch (PNW Research Station, USDA Forest Services). 2004. Remote Sensing of Environment nº 94, págs. 441-449 (2005). <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/37913/1/IND44315847.pdf>

D. APLICACIONES LIDAR:

- **Aplicaciones del LIDAR.** Antonio Ruíz. 2009. Jornadas de trabajo: Altímetro láser, 8 años de experiencia en el ICC. Instituto Cartográfico de Cataluña. http://www.icc.es/index.php/cat/content/download/9799/31323/file/aplicacions_lidar.pdf
- **Aplicaciones LIDAR. Medición de contaminantes.** Alejandra Sosa Izábal. 2005. Trabajo de la asignatura Introducción a los láseres, Departamento de Física, Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F., México. http://docencia.izt.uam.mx/mfg/laseres1/material_adicional/lidar.pdf
- **Airborne LIDAR applications Overview.** John Brock. 2007. Presentación del taller de trabajo sobre Aplicaciones y Tecnología LiDAR. Center for LiDAR Information Coordination and Knowledge (CLICK), United States Geological Survey (USGS). http://lidar.cr.usgs.gov/downloadfile2.php?file=Brock_Lidar_Applications.pdf
- **New Research Reveals Current and Future Trends in LIDAR Applications.** Tina Cary. 2009. Artículo de la revista electrónica número 16 de la empresa Cary and Associates. http://caryandassociates.com/downloads/eijournal_industryinsights.pdf
- **Experiencias y aplicaciones del LIDAR.** A. Ruíz y W. Kornus. 2003. Presentación de la 5ª Semana Geomática de Barcelona. Instituto Cartográfico de Cataluña. http://www.icc.es/index.php/cat/content/download/3805/12687/file/experiencia_y_aplicaciones_lidar.pdf
- **Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial.** Fernando Magdaleno Mas (CEDEX) y Roberto Martínez Romero (Universidad Politécnica de Madrid). 2010. Recursos del Área de Ingeniería Ambiental del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Fomento. <http://ambiental.cedex.es/docs/Ingenieria-Civil-142-2006-Aplicaciones-LiDAR.pdf>
- **Sandia multispectral airborne LIDAR for UAV deployment.** Philip J. Hargis, Alvin R. Lang, Randal L. Schmitt, Tammy D. Henson, James W. Daniels, J. oug Jordan, Kevin L. Schroder y Isaac R. Shokair; SANDIA National Laboratories. 1998. Information Bridge, Departamento de Energía, Estados Unidos. www.osti.gov/bridge/servlets/purl/1069-Twu2Vy/webviewable/1069.PDF
- **LIDAR Provides Fast, Economical, High-Accuracy Digital Elevation Models.** Roland Mangold. 2004. Spatial Resources. <http://www.spatialresources.com/id67.html>

- **Practical Applications of Regional LiDAR.** Sean Whitehead. Capital Area Council of Governments (CAPCOG). 2009. Texas Natural Resources Information System.
http://www.tnris.state.tx.us/uploadedFiles/Education/Forum2009/LiDAR_Pres_Whitehead.pdf
- **Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data.** K. Kraus y N. Pfeifer. 1998. Instituto de Fotogrametría y Percepción Remota, Universidad de Tecnología de Viena. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing num. 53, págs. 193-203.
<http://www.martinkodde.nl/glacier/data/bibliography/2526743040kraus.pdf>

E. BIBLIOGRAFÍA GENERAL:

- **Programming ArcObjects with VBA. A Task-Oriented Approach.** Kang-Tsung Chang. 2007. CRC Press, Taylor and Francis Group. ISBN 13: 978-1-58488-580-1.
- **Piensa en Java.** Bruce Eckel. 2ª edición. 2002. Pearson Educación, S.A. Madrid. ISBN: 84-205-3192-8.
- **Regresión y diseño de experimentos.** Daniel Peña Sánchez de Rivera. 2002. Alianza Editorial, Madrid. ISBN: 84-206-8695-6.

F. REFERENCIAS WEB:

- **ESRI Support.**
<http://support.esri.com/es/>
- **Software LiDAR Libre.**
ALDPAT
<http://www.csc.noaa.gov/digitalcoast...pat/index.html>
FUSION
<http://www.fs.fed.us/eng/rsac/fusion/>
Multiscale Curvature Classification (MCC)
<http://sourceforge.net/apps/trac/mcclidar/>
- **Software LiDAR Comercial.**
LP360 for ArcMap
<http://www.qcoherent.com/>
Toolbox for Lidar Data Filtering and Forest Studies (TIFFS)
<http://globalidar.com/default.aspx>
VG4D Production Manager
<http://www.virtualgeomatics.com/solutions2.html>
VLS LiDAR Analyst. Overwatch Geospatial.
http://www.featureanalyst.com/lidar_analyst.htm
- **LAStools. Department of Computer Science. University of North Carolina.**
<http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>
- **USGS Center for LiDAR Information Coordination and Knowledge (CLICK).**
<http://lidar.cr.usgs.gov/>
- **Spatial Resources.**
<http://www.spatialresources.com/id66.html>
- **libLAS.**
<http://liblas.org/samples/>

- **GeoCue.** LAS Reader.
<http://www.geocue.com/support/utilities.html>
- **ZetaWare.**
<http://www.zetaware.com/utilities/zetalog.html>
- **Kansas Geological Survey.** LAS File Viewer.
<http://www.kgs.ku.edu/stratigraphic/LAS/>
- **Seismatters.** LAS Reader.
<http://www.seismatters.com/LAS%20Reader.html>

PARTE V

Anexos

Anexo

Cartografía forestal

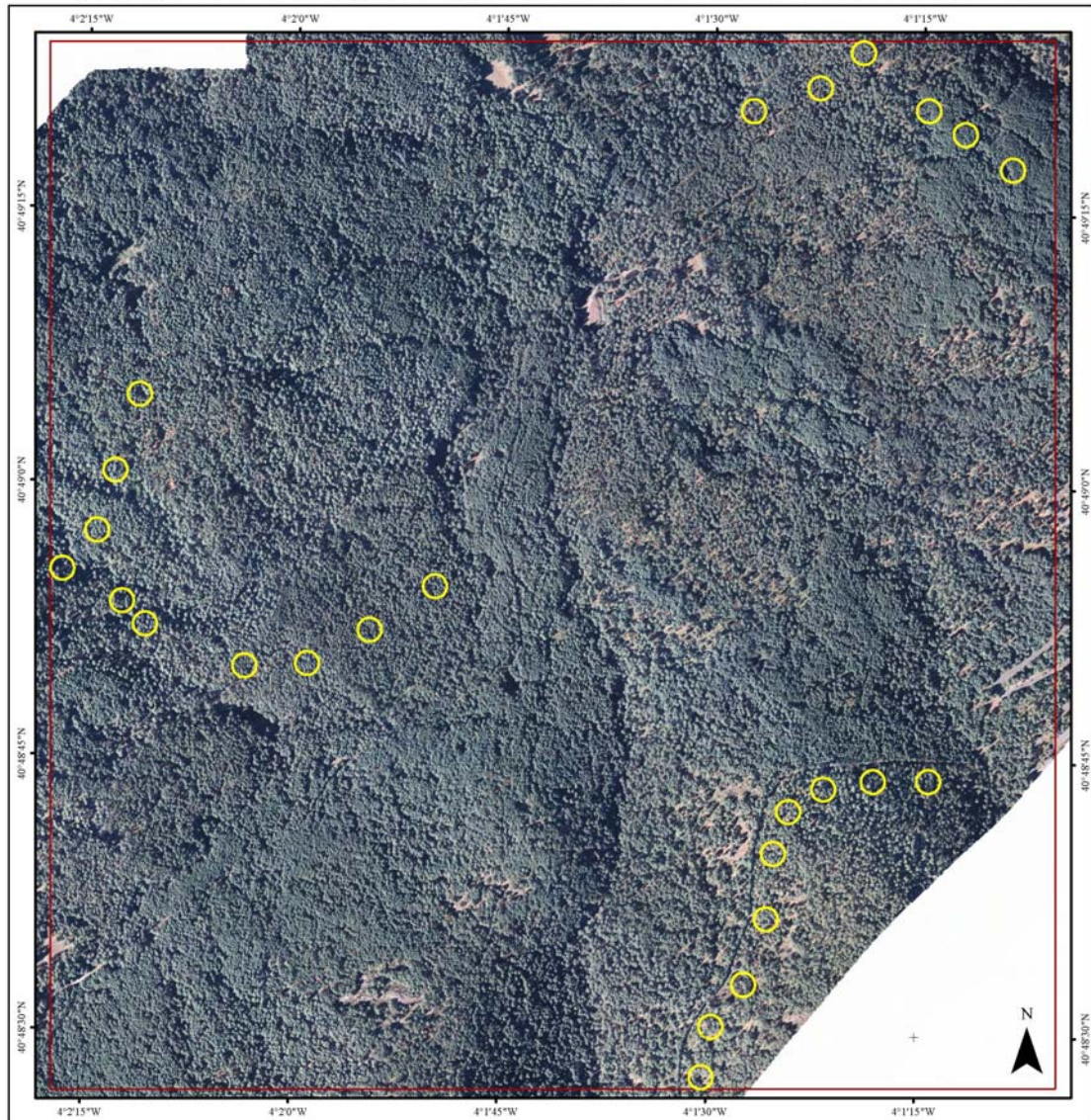
Mapas de localización, volumen forestal y estimación de la biomasa forestal de la zona de estudio de Valsaín (Segovia).

A.1. MAPA DE LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Este mapa muestra la localización del área de estudio así como la distribución de las parcelas donde se han obtenido datos del trabajo de campo.

La base ortofotográfica es la ortofotografía del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea distribuida por el Centro Nacional de Información Geográfica.

MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

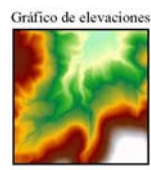


LEYENDA

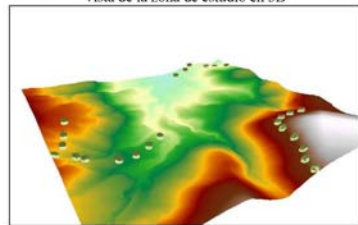
- Parcelas
- Área de estudio

0 125 250 500 Metros

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS 1989
 Coordenadas Geográficas
 ESCALA: 1:9.000



Vista de la zona de estudio en 3D



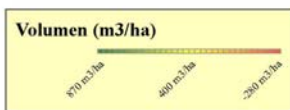
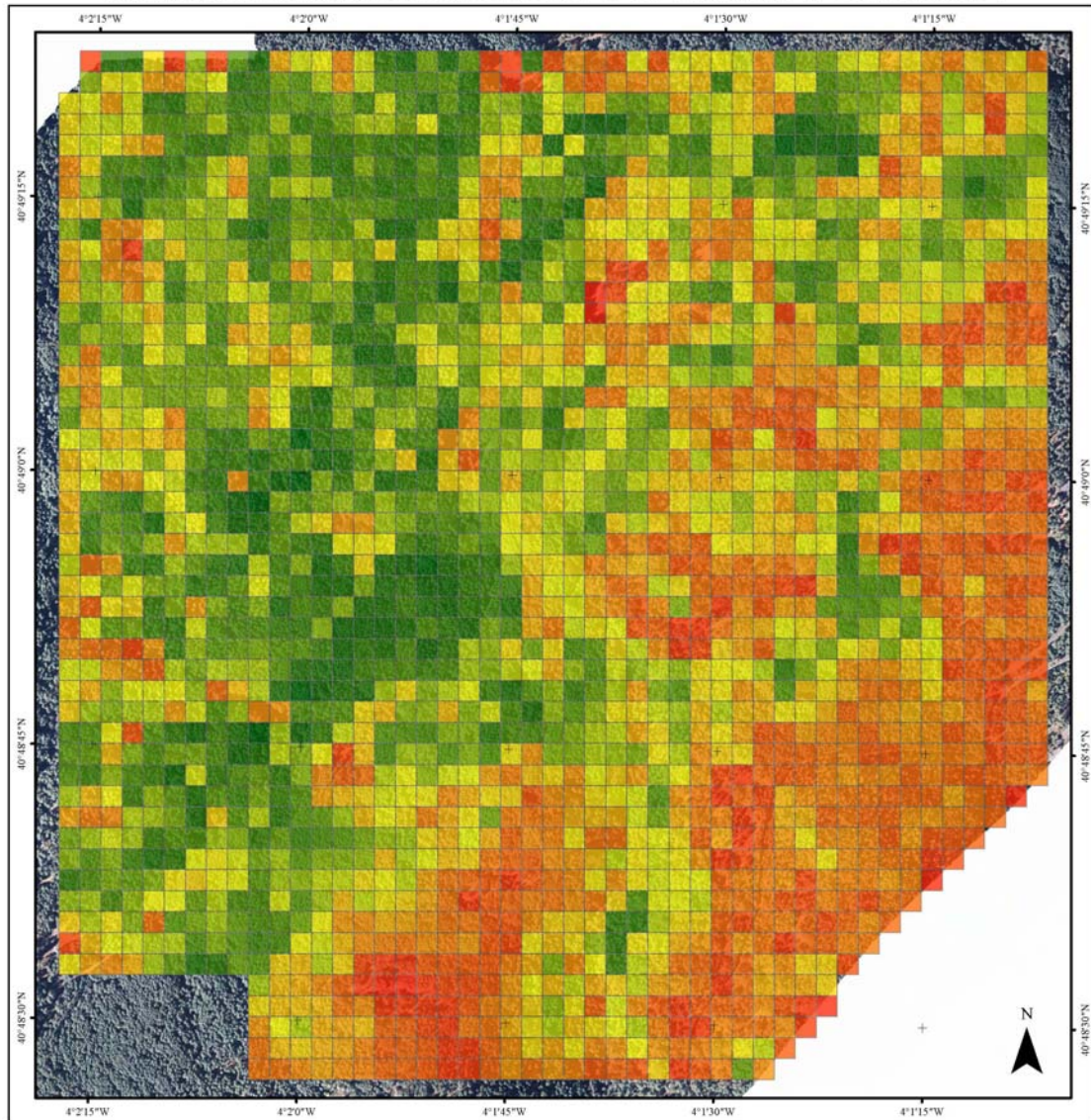
FUENTES: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible BASE ORTOFOTOGRAFICA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (2006)
 AUTOR: Antonio San José Albacete
 FECHA: 10 de Junio de 2011



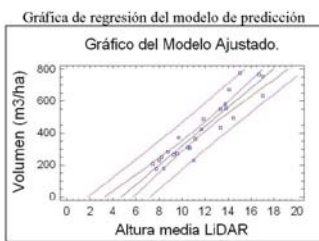
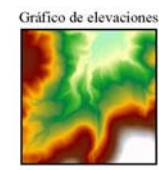
A.2. MAPA DE ESTIMACIÓN DE VOLUMEN FORESTAL

El mapa de estimación de volumen forestal es uno de los productos finales del presente trabajo. Refleja los metros cúbicos por hectárea en el área de estudio.

MAPA DE ESTIMACIÓN DE VOLUMEN FORESTAL



0 125 250 500 Metros
 SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS 1989
 Coordenadas Geográficas
 ESCALA: 1:9.000



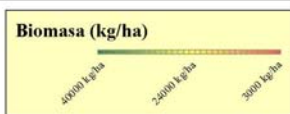
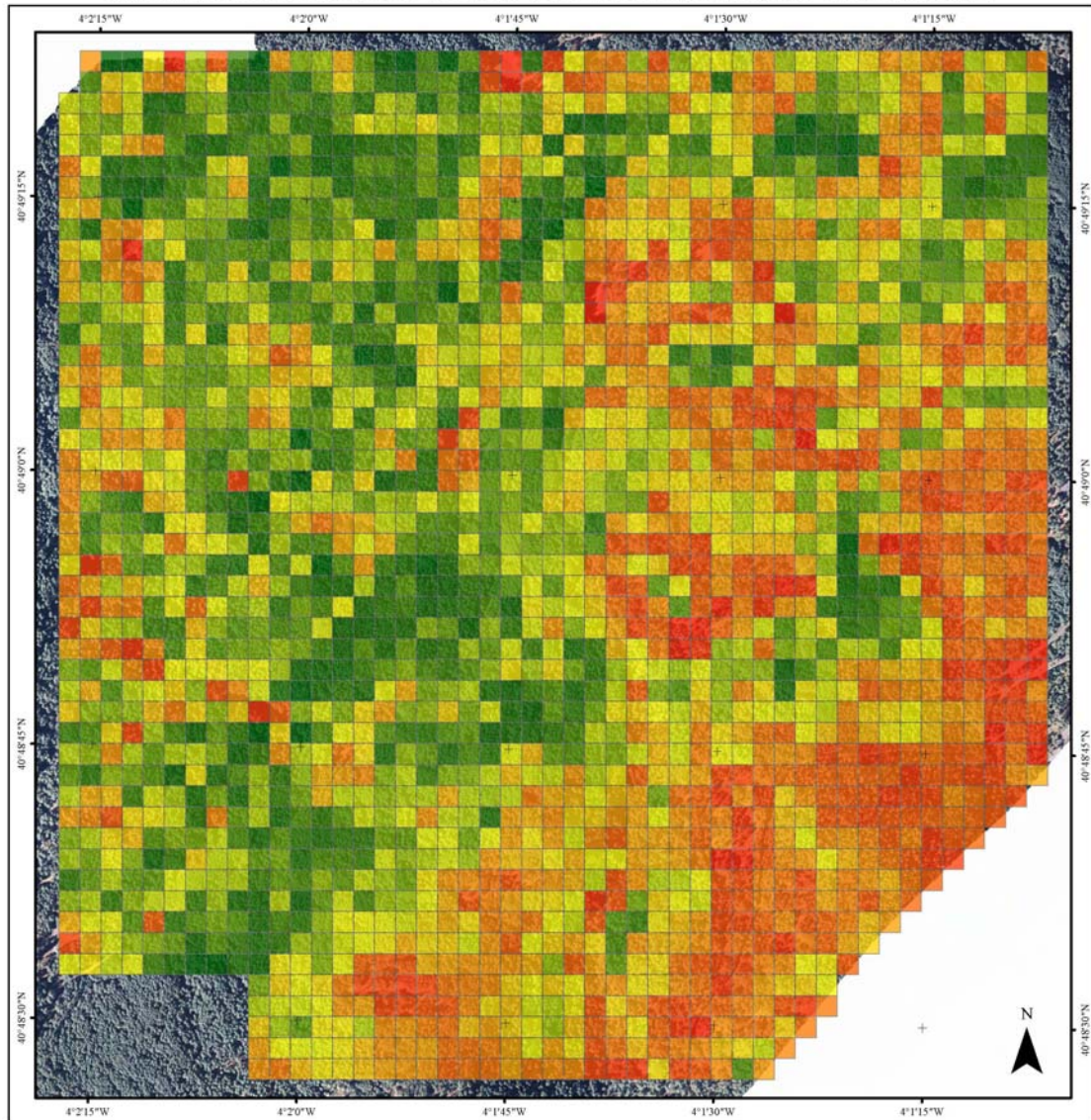
FUENTES: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible BASE ORTOFOTOGRAFICA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (2006)
 AUTOR: Antonio San José Albacete
 FECHA: 10 de Junio de 2011



A.3. MAPA DE ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FORESTAL

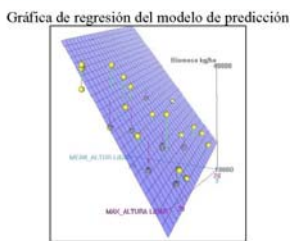
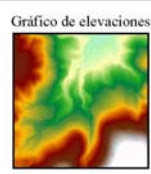
El mapa de estimación de biomasa forestal es el producto final más importante. Muestra la cantidad de kilogramos por hectárea presentes en el área de estudio.

MAPA DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL



0 125 250 500
Metros

SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA: ETRS 1989
Coordenadas Geográficas
ESCALA: 1:9.000



FUENTES: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por el Grupo de Investigación, Tecnologías y Métodos para la Gestión Sostenible BASE ORTOFOTOGRAFICA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (2006)
AUTOR: Antonio San José Albacete
FECHA: 10 de Junio de 2011

