

EL PLAN NACIONAL DE ORTOFOTOGRAFÍA AÉREA (PNOA). APLICACIONES DE LOS DATOS LIDAR A LA INGENIERÍA CIVIL.

Jorge Martínez Luceño, Juan Carlos Ojeda, Guillermo Villa, Eduardo González, Pedro Muñoz y Julián González de Rivera.

Instituto Geográfico Nacional, General Ibáñez de Ibero 3, 28003 Madrid

INTRODUCCIÓN

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) es una Dirección General del Ministerio de Fomento que tiene encomendada, entre sus competencias *la dirección y el desarrollo de planes nacionales de observación del territorio con aplicación geográfica y cartográfica, así como el aprovechamiento de sistemas de fotogrametría y teledetección, y la producción, actualización y explotación de modelos digitales del terreno a partir de imágenes aeroespaciales.* (Art. 13 Real Decreto 638/2010, de 14 de mayo)

Con el objetivo de cumplir con este mandato y dar respuesta a los importantes retos que España tiene en materia de gestión de recursos, desarrollo sostenible, impulso de infraestructuras, etc., para los que es necesario un conocimiento exhaustivo del territorio a partir de imágenes aéreas y espaciales, el IGN promovió la creación del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT).

El PNOT surge con el fin de coordinar las actuaciones de las distintas Administraciones Públicas en la obtención y difusión de información del territorio, con los siguientes objetivos:

- Satisfacer las necesidades de las Administraciones Públicas españolas, de la Unión Europea y del resto de usuarios.
- Obtener información del territorio de forma coordinada (espacial, temporal y semánticamente).
- Obtener, tratar y difundir información y productos homogéneos y de calidad para toda España.
- Cumplir con la Directiva europea INSPIRE.

EL PNOT se estructura en 3 Planes Nacionales: el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), el Plan Nacional de Teledetección (PNT) y el Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE), coordinados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Este proyecto se desarrolla en dos fases:

1. Obtención de imágenes de satélite y aéreas de todo el Estado español (proyectos PNT y PNOA)
2. Extracción de información relativa a la ocupación del suelo (cobertura y uso) a partir de las imágenes capturadas en la primera fase (SIOSE).

El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) nace en el año 2004, con el objetivo de aplicar la directiva INSPIRE a la Observación del Territorio. Antes de 2004, diversos Ministerios y prácticamente todas las Comunidades Autónomas producían ortofotos de forma aislada y descoordinada, por lo que en ocasiones, en un mismo año, se duplicaba la captura de información en una misma zona. La aparición de este proyecto supone una mejora en la coordinación y un ahorro de costes para todas las administraciones implicadas, ya que es un proyecto cofinanciado y compartido por 7 Ministerios y todas las Comunidades Autónomas.

La finalidad del PNOA es la captura periódica de imágenes aéreas de todo el territorio nacional con tamaños de píxel de 0,22 o 0,45 m (según necesidades), a partir de las cuales se obtienen entre otros productos, **Modelos Digitales de Elevaciones (DEM)** en formato GRID, con un paso de malla de 5 m y **ortofotos** con un tamaño de píxel de 25 o 50cm (según el tamaño de píxel del vuelo). Los detalles técnicos del proyecto se pueden consultar en la página web del proyecto PNOA, a la que se accede a través de la página web del IGN: www.ign.es

	GSD Vuelo (cm)	GSD Ortofoto (cm)	Precisión altimétrica del Modelo Digital de Elevaciones	Paso de malla	Precisión planimétrica de la ortofoto
PNOA 50cm	45	50	RMSE $z \leq 2,00$ m	5m x 5m	RMSE $x,y \leq 1,00$ m
PNOA 25cm	22	25	RMSE $z \leq 1,00$ m	5m x 5m	RMSE $x,y \leq 0,50$ m
PNOA 10cm	9	10	RMSE $z \leq 0,20$ m (con LiDAR)	1m x 1m	RMSE $x,y \leq 0,20$ m
LIDAR			RMSE $z \leq 0,15$ m	1.41 x 1.41m	-

Fig 1. Resumen de características técnicas de PNOA

Estos productos son empleados como información de base en un gran número de proyectos que se llevan a cabo por parte de las diferentes Administraciones Públicas (Administración General del Estado, Comunidades Autónomas y Ayuntamientos) y otro tipo de usuarios (como empresas de ingeniería, Google Earth, etc).

Entre los proyectos más destacados que se pueden consultar por Internet y en los cuales se emplean las ortofotos producidas en PNOA están: IBERPIX (visor del Instituto Geográfico Nacional), SIGPAC del Ministerio de Medio Ambiente, la Sede Electrónica del Catastro, la IDEE, Cartociudad, los visores cartográficos de las Comunidades Autónomas y los de las Confederaciones Hidrográficas.

Las ortofotos se distribuyen gratuitamente en ficheros según las hojas del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000 (MTN50) en la web del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG): www.cnig.es. En esta página se pueden descargar además, Modelos Digitales de Elevaciones con paso de malla de 200m y 25m.

COBERTURA DE ORTOFOTOS EN ESPAÑA

Desde el año 2004, el PNOA ha completado 3 coberturas de toda España, pero la mayoría de las Comunidades han terminado ya una tercera y las más avanzadas se encuentran completando la cuarta e incluso la quinta cobertura. Inicialmente el proyecto se diseñó para renovar la capa de ortofotos cada dos años. Actualmente, dada la situación presupuestaria, está en estudio un aumento de los plazos de renovación para pasar a una periodicidad de tres años.

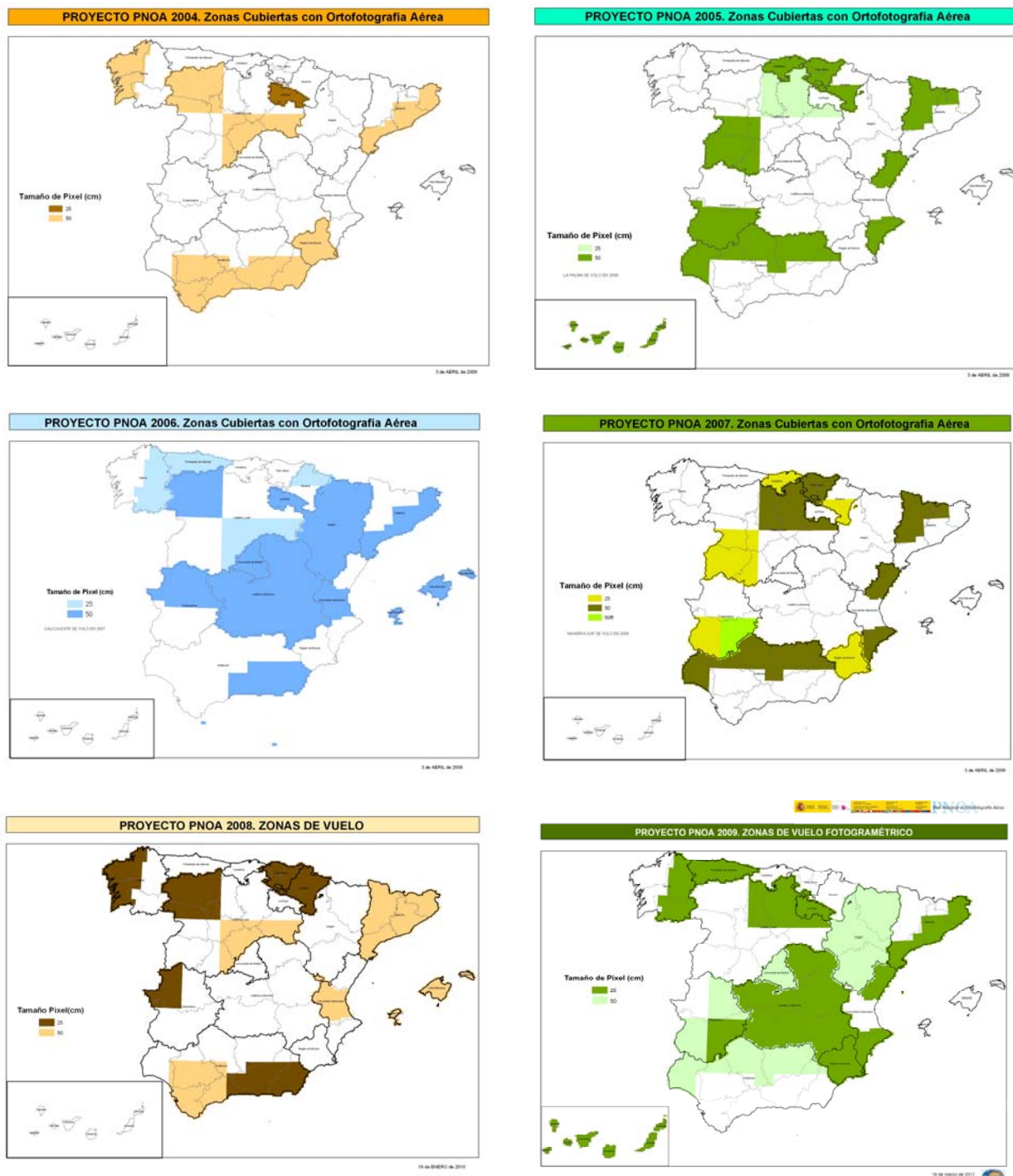


Fig 2. Coberturas de Ortofoto PNOA (2004-2009)

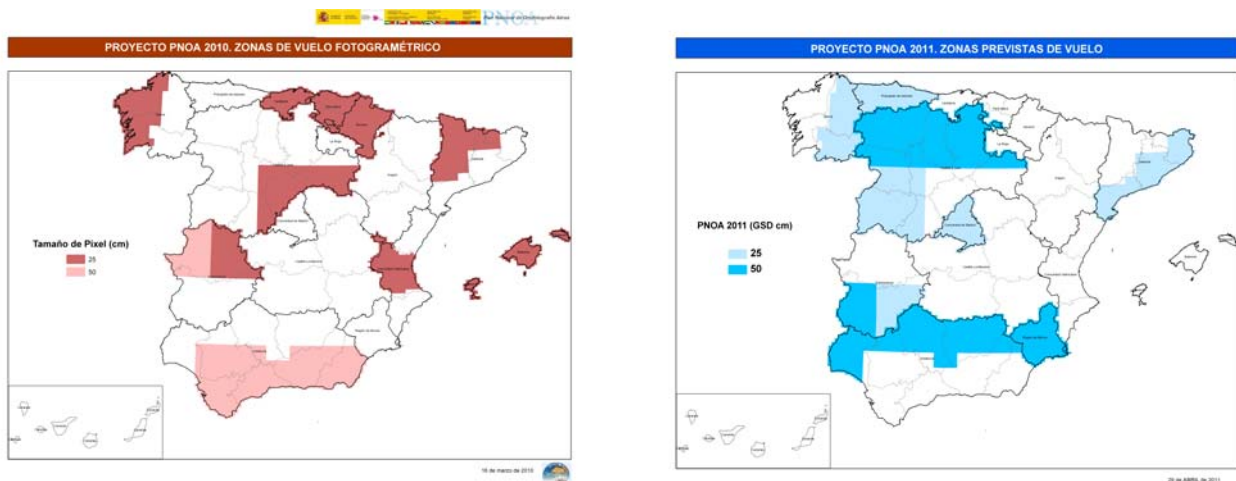


Fig 3. Coberturas de Ortofoto PNOA (2010-2011)

FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA LiDAR (Light Detection And Ranging)

El LiDAR aerotransportado es un sistema activo basado en un dispositivo láser, que emite un haz de luz (pulsos) hacia la superficie terrestre. Un espejo desvía el haz y permite barrer el terreno transversalmente. El sensor LiDAR mide el tiempo que tardan los pulsos en reflejarse en los objetos situados sobre la superficie terrestre y volver.

Las coordenadas de los puntos se obtienen a partir de: la posición y orientación del sensor LiDAR instalado en el avión, la distancia medida entre este y el punto del terreno, y el ángulo de salida del rayo láser.

La posición (x,y,z) del sensor LiDAR se obtiene mediante un receptor GPS/GNSS instalado en el avión empleando métodos cinemáticos, y la orientación mediante una unidad de navegación inercial (IMU/INS). La precisión de las coordenadas de la nube de puntos LiDAR, dependerá de la precisión con la que se obtenga en cada momento, la posición y orientación del sensor, por lo que en el proyecto PNOA la distancia entre el receptor GPS/GNSS instalado en el avión y la estación de referencia GPS colocada en tierra, tiene que ser menor de 40 km.

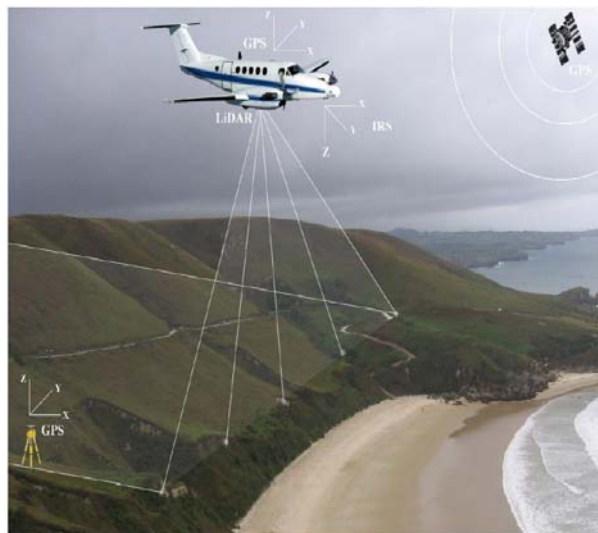


Fig 4. Barrido LiDAR (Imagen cortesía de DIELMO 3D S.L)

Los sensores actuales son capaces de distinguir hasta 4 retornos para cada pulso, por lo que en algunas zonas de vegetación poco densa, pueden atravesar la cubierta vegetal y es posible diferenciar la vegetación del suelo, es decir se podrán calcular las alturas de los árboles. Las superficies de agua no producen retornos por lo que son fácilmente detectables.

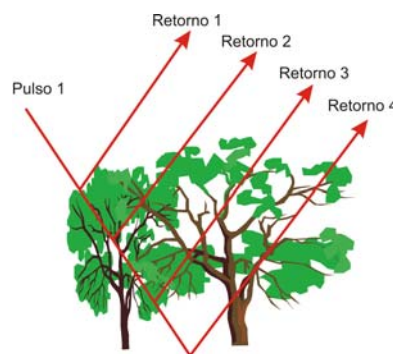


Fig 5. Múltiples retornos

COBERTURA LIDAR EN ESPAÑA

El proyecto PNOA se encuentra en continua evolución, adaptándose a las necesidades de los usuarios y al desarrollo de nuevas tecnologías, tanto en la captura de la información del territorio, como en el tratamiento de los datos. Entre sus logros se encuentra la incorporación al proyecto de las cámaras digitales junto con dispositivos GPS-IMU (2006) y los sensores LiDAR (2009), lo que ha permitido a las empresas españolas situarse a la vanguardia en la utilización de la tecnología más avanzada, y ser muy competitivas a nivel internacional.

El último ejemplo de incorporación al proyecto de las nuevas tecnologías se produce en el año 2009. En este año surge la necesidad de obtener Modelos Digitales del Terreno (MDTs) de alta precisión, en las Cuencas Hidrográficas competencia de la Administración General del Estado.

Ante esta necesidad, el IGN inicia la **cobertura con datos LiDAR** de todo el territorio nacional, empleando para ello sensores LiDAR aerotransportados de última generación. Las principales características de las nubes de puntos obtenidas son: distancia media entre puntos de 1,41 m, densidad media de 0,5 pulsos/m² y precisión altimétrica mejor de 20 cm. Los MDTs de alta precisión se obtienen procesando estas nubes de puntos LiDAR.

La cobertura LiDAR de todo el territorio de un país, es un hecho novedoso a nivel internacional, ya que únicamente Dinamarca, Suiza y Holanda disponen de una cobertura completa, mientras que otros países como Estados Unidos, Suecia, Finlandia y España aún no la han completado.

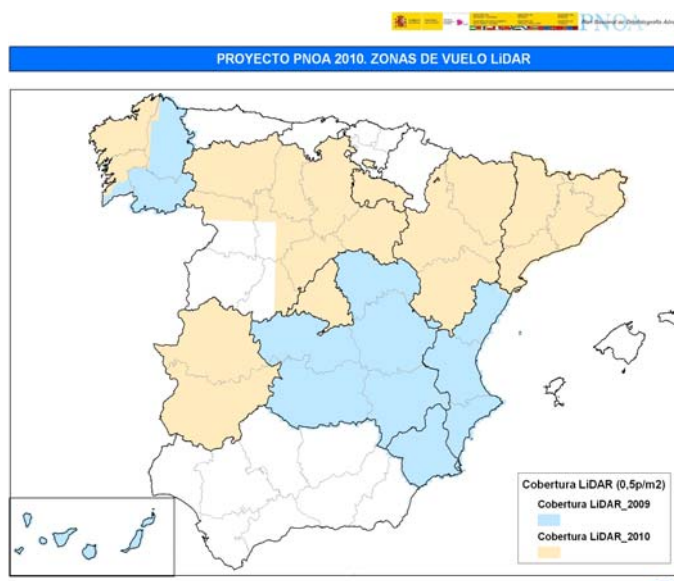


Fig 6. Cobertura LiDAR en España (situación actual)

En España actualmente están cubiertos con datos LiDAR 358.000 km², quedando pendientes 147.000 km² para completar todo el territorio. En el año 2009 se capturaron datos en las Comunidades Autónomas de Castilla la Mancha, Valencia, Murcia, Canarias y la mitad este de Galicia, y durante el año 2010 se cubrieron las Comunidades de Aragón, Madrid, Extremadura, La Rioja, ¾ partes de Castilla y León, la mitad Oeste de Galicia y se terminó la cobertura de Cataluña, (que se inició en 2008).

Hasta hace no mucho tiempo, la tecnología LiDAR había sido utilizada exclusivamente en investigación o en estudios de zonas muy limitadas debido a su elevado coste, pero el proyecto PNOA ha cubierto el 70% de España gracias a la utilización de sistemas de captura de última generación y a la división del territorio en zonas de trabajo extensas, lo que ha permitido reducir el coste unitario de captura a 14 euros/Km². (En zonas montañosas este coste unitario es algo más elevado debido a la complejidad de las operaciones a realizar para cumplir con las especificaciones técnicas exigidas en el proyecto).

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y CONTROL DE CALIDAD EN LA COBERTURA PNOA-LIDAR

Como en cualquier actividad cartográfica, los procedimientos de captura de la nube de puntos LiDAR y el procesado de los datos deben estar basados en una metodología que permita garantizar la calidad de los mismos. El proyecto PNOA tiene establecido unas Especificaciones Técnicas que incorporan procedimientos operativos, unos para ser realizados antes de que se ejecute el vuelo (Aseguramiento de la Calidad) y otros a realizarse una vez capturada y procesada la nube de puntos LiDAR (Control de Calidad).

Entre los primeros están los vuelos para calibrar el sensor LiDAR. El objetivo de estos vuelos de calibración es determinar los errores inherentes al sistema, de manera que sean tenidos en cuenta al realizar la planificación del vuelo y el procesado de los datos y no afecten a las características exigidas en el proyecto, como por ejemplo a la densidad de puntos o a la precisión altimétrica de los mismos.

Los procedimientos de Control de Calidad están dirigidos fundamentalmente a comprobar que se cumplen las características definidas en el proyecto. Algunos de los controles de calidad que se realizan son: determinación de la densidad de puntos, porcentaje de solapamiento entre pasadas, identificación de zonas sin puntos, etc. Además se realiza un chequeo adicional que permite establecer la precisión altimétrica de los datos. El chequeo consiste en comparar las altitudes de una serie de puntos observados con técnicas GPS, con las de los puntos LiDAR cercanos.

Otra utilidad de estos campos de control es conectar la nube de puntos al sistema de referencia, en un proceso que se conoce como *ajuste de pasadas al terreno*, por el que se eliminan errores sistemáticos de la nube de puntos.

Los resultados obtenidos en los controles de calidad demuestran que los datos LiDAR capturados en el PNOA cumplen con las especificaciones técnicas, e incluso en muchos casos las mejoran.

FLUJO DE TRABAJO EN LA CAPTURA Y PROCESADO DE LOS DATOS LIDAR

Como paso previo a la captura de datos, las empresas entregan una planificación del vuelo a realizar. Esta planificación pasa un exhaustivo control de calidad comprobando que cumple con todos los apartados reflejados en las especificaciones técnicas del proyecto. Además de la planificación, las empresas entregan también un fichero con las estaciones de referencia que se van a utilizar durante el trabajo, éstas son seleccionadas entre las que tiene implantadas el Instituto Geográfico Nacional en todo el territorio, las que tienen las Comunidades Autónomas o las pertenecientes a empresas que han instalado redes privadas. En el caso de no disponer de ninguna estación de referencia con las características adecuadas para el proyecto, la empresa de vuelo debe colocar los receptores GPS/GNSS necesarios en vértices REGENTE.

Las líneas de vuelo se planifican con dirección este-oeste cuando el vuelo LiDAR se realiza simultáneamente con un vuelo fotogramétrico (cámara fotogramétrica y LiDAR instalados en el mismo avión) y se pueden adaptar a las limitaciones impuestas por el relieve, en los casos en los que vuelo LiDAR sea independiente.

También es obligatorio para las empresas que han de llevar a cabo el trabajo, realizar una calibración del sistema integrado (sensor LIDAR-GNSS-INS) previa a la ejecución del vuelo. Este paso se lleva a cabo sobre campos de calibración (zonas en las que se conocen perfectamente las coordenadas de una serie de puntos identificables por el sensor), para obtener un conjunto de parámetros que servirán para corregir los datos adquiridos.

Para poder obtener una mayor precisión altimétrica de la nube de puntos LiDAR y comprobar la bondad de estos, se establecen unos campos de control distribuidos por el interior y los límites de la zona de trabajo. En ellos se determinan las coordenadas de una serie de puntos mediante técnicas GPS y cuyas altitudes son comparadas con las altitudes de los puntos LiDAR próximos.

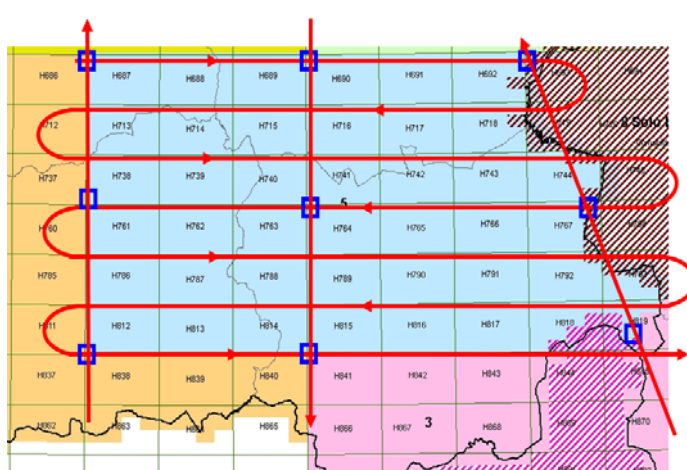


Fig 7. Pasadas longitudinales y Transversales sobre campos de control

Sobre estos campos de control se hace pasar una línea de vuelo (pasada transversal). Con las altitudes de los puntos observados con técnicas GPS, se ajustan las pasadas transversales al terreno y con ellas se realiza el ajuste de las pasadas longitudinales (pasadas este-oeste). De esta forma se garantiza que la

nube de puntos LiDAR completa, se ajusta al terreno y no existen errores sistemáticos verticales.

Las coordenadas de la nube de puntos LiDAR procesada están referidas al sistema de referencia ETRS89, que es el utilizado en la Península, Baleares, Ceuta y Melilla, y al REGCAN95 en el archipiélago Canario, tal como establece el Real Decreto 1071/2007 por el que se regula el sistema geodésico de referencia en España. La proyección utilizada es la “Universal Transversal Mercator” (UTM) en el huso correspondiente a cada zona. Las altitudes que inicialmente se obtienen son altitudes elipsoidales, referidas al elipsoide SGR80, por lo tanto para ser empleadas en la mayoría de los proyectos, es necesario un proceso posterior para transformarlas a altitudes ortométricas con el modelo de Geoide EGM2008-REDNAP.

Los datos son almacenados en ficheros que cubren una extensión de 2x2 km, que pueden contener entre 3 y 10 millones de puntos cada uno. Los ficheros se almacenan según la estructura de formato LAS, el estándar aprobado por el ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) para el almacenamiento de datos LiDAR.

El formato LAS es binario, y consta de dos partes: la primera es la cabecera del fichero, en la que se almacena la información relativa al programa con el que se han generado los datos, las coordenadas x, y, z mínima y máxima del fichero, el número de pulsos y el número de puntos. La segunda parte almacena la información de cada punto: coordenadas x, y, z de cada uno de ellos, intensidad, número de retorno, número de retornos por punto, dirección de escaneado, ángulo de escaneado, número de pasada, datos relativos a la clasificación de los puntos del fichero, e incluso información radiométrica obtenida a partir de fotografías aéreas correspondientes.

Cuando los datos han sido procesados y entregados al IGN, por parte de las empresas contratistas se realiza un control de calidad comprobando que:

- a) La zona de trabajo queda totalmente cubierta.
- b) Se cumple la densidad que indican las especificaciones.
- c) Los datos tienen las precisiones altimétricas exigidas.
- d) No existen escalones entre pasadas.
- e) No existen zonas sin información
- f) Etc,

Una vez finalizado el control de calidad y corregidas las posibles incidencias, los datos están listos para poder usarse en múltiples aplicaciones. En el Instituto Geográfico Nacional se está generando un Modelo Digital del Terreno de 5m de paso de malla que sustituirá al actual, obtenido mediante técnicas de correlación automática a partir de las fotografías aéreas.

Para generar este nuevo Modelo Digital, en primer lugar hay que realizar una clasificación automática de los puntos LiDAR. Como se ha explicado antes, la nube de puntos LiDAR contiene información del terreno y de los objetos situados sobre él, como la vegetación y las edificaciones. Mediante una serie de algoritmos

específicos se puede clasificar la nube de puntos LiDAR en las clases: terreno, vegetación baja, media, alta y edificaciones.

Esta clasificación automática puede contener errores y por ello se debe realizar una revisión y una edición manual del resultado obtenido. Uno de los métodos empleados consiste en superponer la nube de puntos a las ortofotos, para comparar la clasificación con la imagen y corregir los posibles errores.

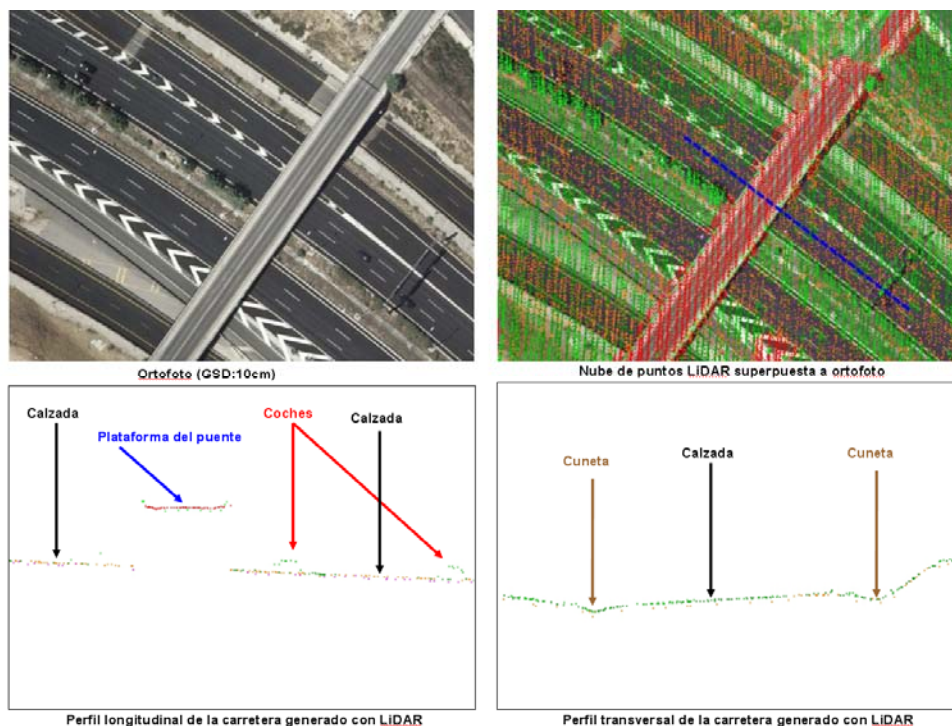


Fig 8. Perfil longitudinal y transversal (datos LiDAR clasificados)

Esta clasificación es fundamental ya que en función del proyecto al que se vayan a destinar los datos, interesará una información (terreno) u otra (edificios, vegetación, etc).

Una vez obtenida la nube de puntos LiDAR clasificada, se genera el Modelo Digital del Terreno (MDT) a partir de la clase terreno, esto significa que en el cálculo no se han incluido los puntos clasificados como edificios o vegetación.

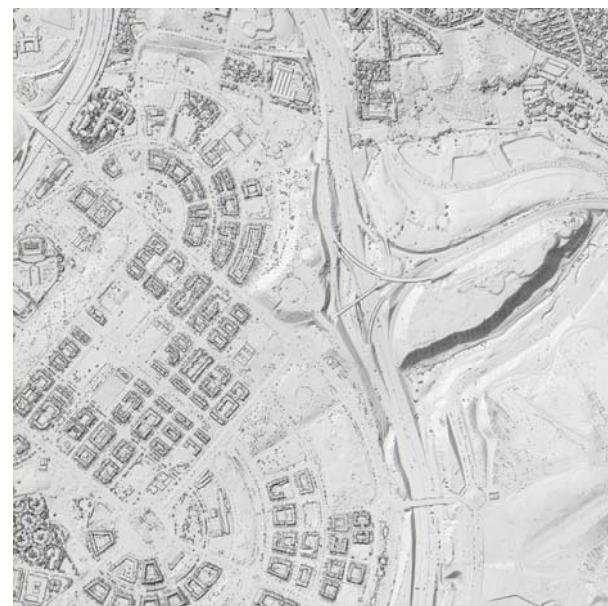
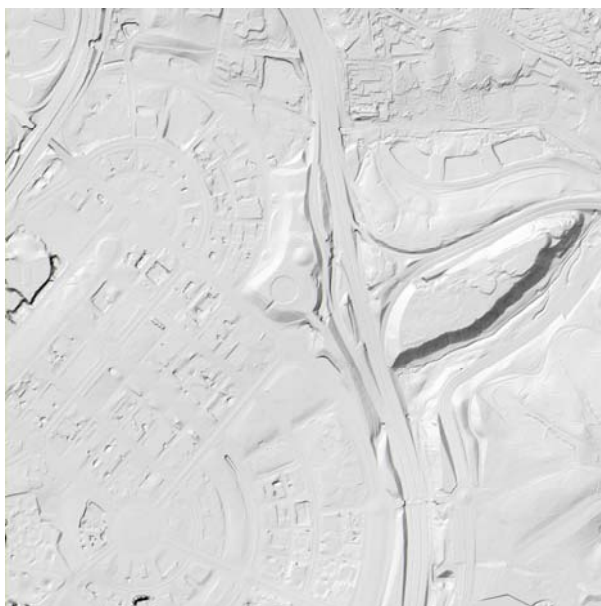


Fig 9. Sombreados. Izq: Modelo Digital del Terreno. Dcha: Modelo Digital de Superficie

Además, el IGN tiene en marcha estudios para generar productos de valor añadido con los datos LiDAR, como son:

- Nube de puntos LiDAR con información RGB obtenida de las fotografías aéreas.

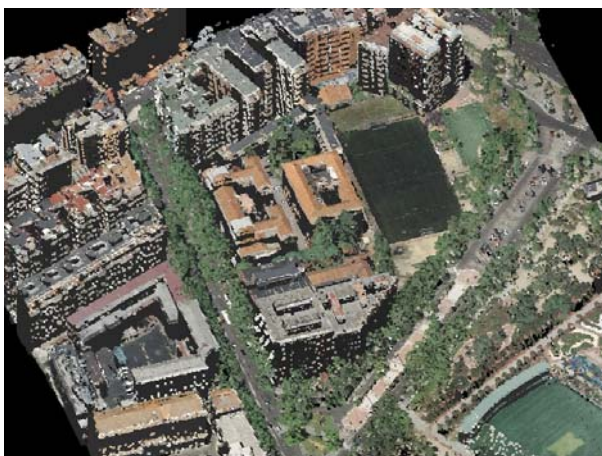


Fig 10. Izq: Zona Urbana (Sede Central del IGN). Dcha: Zona rural

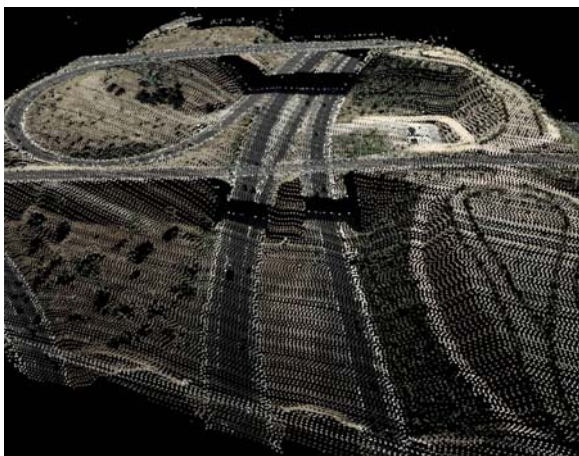


Fig 11. Enlaces de autovías

- Modelización de ciudades 3D.

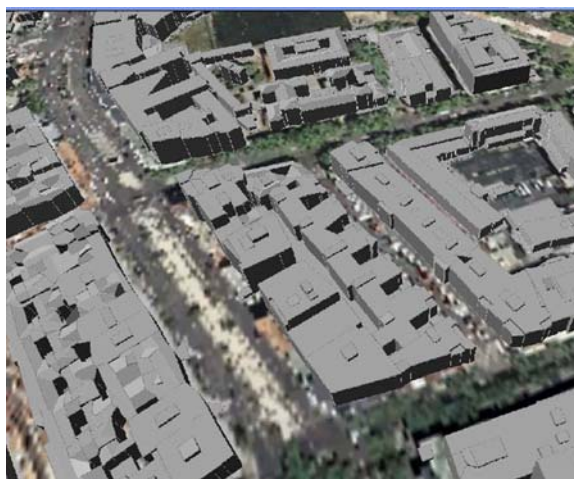


Fig 12. Modelización 3D. Densidad 1p/m²

- Estudios de cuencas hidrográficas

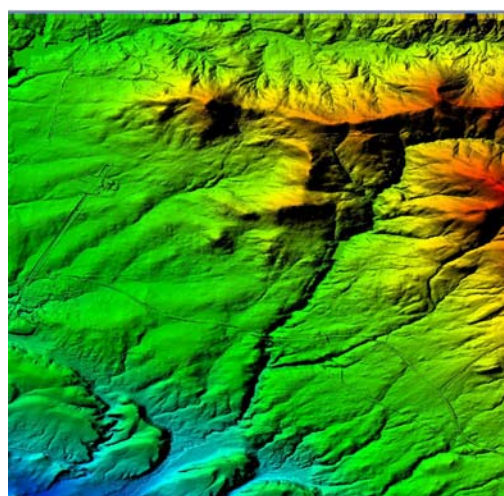
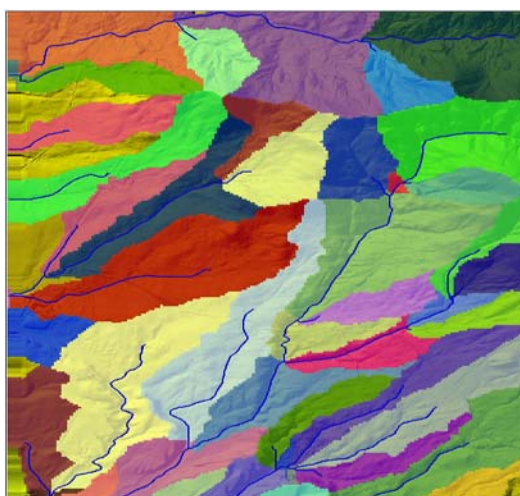


Fig 13. Izq: Generación automática de cuencas. Dcha: Sombreado del MDT

APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA LIDAR A LA INGENIERÍA CIVIL

Los datos LIDAR y los Modelos Digitales de Elevaciones de alta precisión obtenidos a partir de los mismos tienen múltiples aplicaciones en Ingeniería Civil, como por ejemplo:

- Cálculo de cubicaciones en movimientos de tierras.
- Determinación de curvas de nivel.
- Determinación precisa de secciones longitudinales (pendientes, longitudes) y transversales (peraltos).
- Identificación de zonas inundables
- Estudios de drenaje
- Generación de Mapas de ruido
- Análisis de impacto visual, etc

En la actualidad, la información aportada por este proyecto está siendo utilizada para la generación de la cartografía de zonas inundables del Ministerio de Medio Ambiente (D.G. del AGUA), así como en muchos otros proyectos, ya que en función de la densidad de puntos son una herramienta indispensable para la realización de inventarios forestales, estudios para la determinación de riesgos

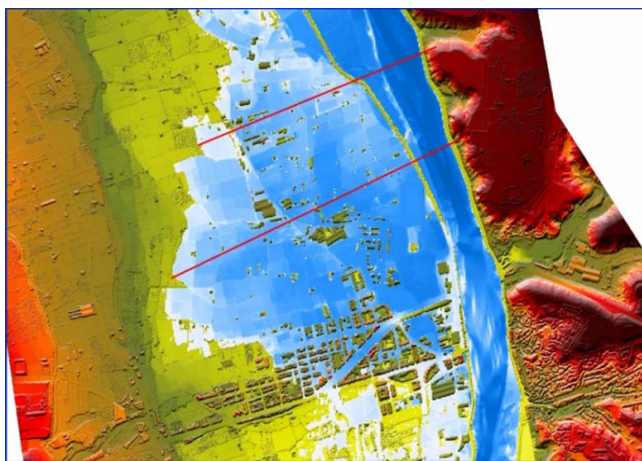


Fig 14. Simulación de inundación sobre un MDS

de deslizamientos y avalanchas, estudios hidrológicos, dinámica de zonas costeras, mapas de pendientes, proyectos medioambientales, mapas de obstáculos en zonas aeroportuarias, arqueología, modelado 3D de ciudades, ubicación de antenas de telecomunicaciones, detección de edificaciones no censadas, y otras muchas que irán apareciendo con el tiempo.

Las últimas tendencias en la captura de información se centran en los denominados **LiDAR mobile**. Una de sus versiones consiste en un sensor LiDAR instalado en un automóvil con el objetivo de cartografiar vías de comunicación.



Todavía no es una tecnología ampliamente utilizada pero ya se han puesto de manifiesto algunas de sus aplicaciones y seguramente en no mucho tiempo irán apareciendo muchas más. Algunas de ellas son:

- Cálculo de secciones longitudinales y transversales
- Caracterización de puentes
- Inventario de señales
- Inspección del pavimento, de taludes
- etc.



Fig 15. Montajes de Lidar Mobile