



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-527

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Aplicación de la tecnología LiDAR al seguimiento ecológico en la Red de Parques Nacionales

TOMÉ MORÁN, J.L.¹, BONACHE LÓPEZ, J.², MONTERO JIMÉNEZ, M.¹, NORIEGA ALONSO, M.A.¹ y MARINO DEL AMO, E.¹

¹ Agresta S. Coop. C/ Duque de Fernán Núñez, 2, 1º 28012. Madrid.

² Organismo Autónomo Parques Nacionales.

Resumen

La Ley 30/2014, de Parques Nacionales, otorga al Estado el cometido de realizar un seguimiento general de la Red de Parques Nacionales. El Organismo Autónomo Parques Nacionales desarrolla para ello un Plan de Seguimiento y Evaluación, con iniciativas de seguimiento ecológico, sociológico y funcional, en colaboración con las comunidades autónomas y con asesoramiento científico. Algunos de los proyectos de seguimiento ecológico en marcha son la elaboración de una cartografía continua y comparable de los sistemas naturales de la Red, y el seguimiento de la estructura de los ecosistemas mediante la tecnología LiDAR, al que se ha dado un enfoque a largo plazo, aprovechando la finalización en 2015 de la primera cobertura LiDAR nacional por parte del proyecto PNOA-LiDAR del Instituto Geográfico Nacional, obtenida mediante sensores aerotransportados. La presente comunicación describe la metodología desarrollada para el procesamiento y análisis de los datos LiDAR, así como para la integración de la información resultante en la cartografía de los sistemas naturales, enriqueciendo las bases de datos de la unidad SIG de la Red de Parques Nacionales. La segunda cobertura LiDAR, con periodicidad sexenal prevista, garantizaría otra actualización de la cartografía y un seguimiento de la evolución de la estructura de los sistemas naturales.

Palabras clave

Sistemas naturales, cartografía, PNOA, sensores, estructura de vegetación

1. Introducción

La Red de Parques Nacionales constituye una muestra representativa de los principales sistemas naturales españoles, y está formada por espacios naturales con unos valores tan destacados que hacen que su conservación merezca una atención preferente y se declare de interés general del Estado. En la actualidad, son 15 los parques nacionales declarados en el territorio español, situados en 12 comunidades autónomas.

Tal y como se establece en la Ley 30/2014, de 3 de diciembre, de Parques Nacionales, la gestión y organización de estos espacios naturales corresponde directamente a las comunidades autónomas en cuyos territorios estén situados, incluidos los marítimo-terrestres cuando exista continuidad ecológica del ecosistema terrestre con el marino. A su vez, la gestión de la Red de Parques Nacionales corresponde a la Administración General del Estado, a través del Organismo Autónomo Parques Nacionales (en adelante OAPN).

La gestión de la Red se apoya en distintos órganos colegiados en los que están representados tanto el Estado como las comunidades autónomas que tienen parques nacionales en su territorio. Esta gestión se sustenta principalmente en el desarrollo de las actuaciones que el Plan Director de la Red de Parques Nacionales (Real Decreto 389/2016, de 22 de octubre), el más elevado instrumento de planificación y ordenación de estos espacios de carácter básico, encomienda al OAPN. En concreto, los dos primeros epígrafes del artículo 8.5 del citado Plan Director establecen como actuaciones la configuración del Plan de Seguimiento y Evaluación de la Red de Parques Nacionales

elaborado en cooperación con las administraciones gestoras, y el establecimiento en este plan de tres programas diferenciados: seguimiento ecológico, socioeconómico y seguimiento funcional.

El Plan de Seguimiento y Evaluación de la Red, con sus programas diferenciados, ya se ha estado poniendo en marcha en los últimos años, en cumplimiento de la competencia de seguimiento general de la Red, atribuida a la Administración General del Estado, y se continuará articulando siguiendo lo estipulado en el Plan Director de la Red de Parques Nacionales, en colaboración con las comunidades autónomas y a través del Grupo de Trabajo de Seguimiento de la Red, que depende del Comité de Colaboración de Parques Nacionales, órgano colegiado creado por la Ley 30/2014. Del Plan de Seguimiento y Evaluación se derivan en la actualidad varias iniciativas de seguimiento general, que se complementan con las más específicas que son llevadas a cabo en cada parque nacional por sus administraciones gestoras.

El programa de seguimiento ecológico del plan es el que evalúa la representatividad de la Red de Parques Nacionales, el estado de conservación de los sistemas naturales y el cambio global en la Red. Incluye en la actualidad iniciativas de seguimiento de los siguientes ámbitos: estado fitosanitario de las masas forestales, fenología de especies forestales, especies indicadoras de cambio climático, medio marino, aves comunes, lepidópteros, productividad de los ecosistemas (mediante técnicas de teledetección), estructura de los ecosistemas, cartografía de los sistemas naturales, etc.

Estas iniciativas están dirigidas sobre todo a obtener información relacionada con el estado de conservación de los parques nacionales, en el marco de lo dispuesto en el Plan Director de la Red de Parques Nacionales con relación a los parámetros para el seguimiento (artículo 5.2) y a los criterios para la determinación del nivel de conservación (artículo 5.1). Algunas de ellas aportan información relacionada con la composición de los sistemas naturales (cartografía, seguimiento de aves comunes y lepidópteros, etc.), otras con el funcionamiento (seguimiento de la productividad, etc.) y otras con la estructura, y para esto último se está utilizando la tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging).

El sensor LiDAR aerotransportado es capaz de calcular la posición de cada punto escaneado, midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso de energía y su llegada al sensor tras haber sido reflejado en dicho elemento de la superficie terrestre. El producto de un vuelo LiDAR es una nube de puntos de alturas del terreno a partir de la que se pueden generar modelos digitales del terreno, caracterizando tanto las elevaciones como la vegetación. Presenta la ventaja respecto a otros sensores de poder penetrar en la cubierta vegetal y capturar de esta forma información de alturas y coberturas de los distintos estratos de vegetación, caracterizando la estratificación forestal y permitiéndonos así afrontar el seguimiento de la estructura de los ecosistemas forestales.

Estas características llevaron al Grupo de Trabajo de Seguimiento de la Red a considerar que la utilización de esta tecnología tenía una elevada potencialidad para el seguimiento de la estructura de los ecosistemas pudiendo ser abarcable a nivel de la Red de Parques Nacionales. El OAPN realizó un proyecto piloto en el Parque Nacional de Monfragüe (Tragsatec, 2010), con el objetivo de testar metodologías para su futura aplicación en el seguimiento de la Red. Para ello se contó con los datos procedentes de un vuelo LiDAR específico con una alta resolución (5 pulsos/m² para todo el Parque y 40 pulsos/m² en una zona de 100 Ha), y se compararon los resultados obtenidos con los de los vuelos realizados por el Instituto Geográfico Nacional (en adelante IGN) en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (en adelante PNOA), que tienen una densidad promedio de 0,5 pulsos/m².

En esta comunicación presentamos la siguiente fase, financiada por el OAPN y desarrollada gracias a un convenio de colaboración entre este organismo y el IGN, en la que se ha llevado a cabo el procesamiento de los datos del PNOA coincidentes con la superficie terrestre de los 15 parques nacionales que conforman actualmente la Red, con el fin de enriquecer la cartografía de sistemas naturales de vegetación de la Red de Parques Nacionales (Tragsatec, 2013).

El hecho de disponer de una cartografía continua, general y comparable de los sistemas naturales de la Red de Parques Nacionales permite una caracterización común de los sistemas presentes en los parques nacionales, que a la vez sirve de base para el seguimiento ecológico. Esta cartografía, que se repetirá periódicamente, ha sido desarrollada por el OAPN en colaboración con las comunidades autónomas, y representa los sistemas naturales vegetales (a escala 1:10.000) y los sistemas naturales geológicos (a escala 1:25.000). Se han cartografiado los sistemas naturales del anexo de la Ley 30/2014 y los de su clasificación de desarrollo más detallada (realizada para los sistemas naturales vegetales por la Unidad de Botánica del Departamento de Biología de la Universidad Autónoma de Madrid, y para los sistemas naturales geológicos por el Instituto Geológico y Minero de España).

Cuando se comparen los datos actualmente disponibles con los de los próximos vuelos LiDAR del PNOA (ya hay algunos parques nacionales en los que se ha volado la segunda cobertura), se obtendrá una información muy valiosa sobre la evolución de la estructura de la vegetación, y por lo tanto sobre uno de los aspectos importantes relacionados con el estado de conservación de los sistemas naturales. Por ello, en el VI Seminario de Protocolos de Seguimiento a Largo Plazo en la Red de Parques Nacionales, dedicado a la “Aplicación de la teledetección al seguimiento del estado de conservación de los sistemas naturales”, que tuvo lugar en septiembre de 2016 en el Centro Nacional de Educación Ambiental (CENEAM), se constató la utilidad de la aplicación de la tecnología LiDAR al seguimiento ecológico en la Red de Parques Nacionales.

2. Objetivos

El proyecto se sustenta en el cumplimiento de lo dispuesto en el Plan Director de la Red de Parques Nacionales (Real Decreto 389/2016, de 22 de octubre), con relación al Plan de Seguimiento y Evaluación de la Red, en relación a los parámetros para el seguimiento y a los criterios para la determinación del nivel de conservación.

En el marco del objetivo general de aplicación de la tecnología LiDAR para el seguimiento de la estructura de la vegetación en la Red de Parques Nacionales, el proyecto tiene el objetivo específico de procesar los datos LiDAR procedentes del PNOA coincidentes con el territorio de los 15 parques nacionales actualmente declarados, para generar productos útiles para el seguimiento ecológico de la Red y enriquecer la cartografía existente de sistemas naturales de los parques nacionales con datos de alturas, coberturas y continuidad de los distintos estratos de vegetación.

3. Metodología

Como fuente de datos para el presente trabajo se han utilizado la cartografía de sistemas naturales de vegetación de la Red de Parques Nacionales, elaborada por el OAPN, y los datos LiDAR del PNOA. Estos últimos son coberturas realizadas mediante colaboración y cofinanciación entre el Ministerio de Fomento por medio del IGN y el Centro Nacional de Información Geográfica (en adelante CNIG), el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (por medio de la Dirección General del Agua, las Confederaciones Hidrográficas y el FEGA) y el Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas (por medio de la Dirección General del Catastro), además de las Comunidades Autónomas.

Las nubes de puntos tienen una densidad promedio de 0,5 pulsos/m² y una precisión altimétrica con un error medio cuadrático inferior a 20 cm en altura. El propio CNIG suministra los datos una vez procesados en bloques de 2x2 km en ficheros digitales con formato “laz”. Las nubes de puntos suministradas tienen alturas ortométricas, clasificación automática y están coloreadas a partir de las propias ortofotos RGB del PNOA. El sistema geodésico de referencia es ETRS89 en la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias (ambos sistemas compatibles con WGS84) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada fichero.

En la figura 1, se puede apreciar el flujo de procesado aplicado a las nubes de puntos LiDAR para cada uno de los parques nacionales estudiados con objeto de caracterizar los sistemas naturales de vegetación.

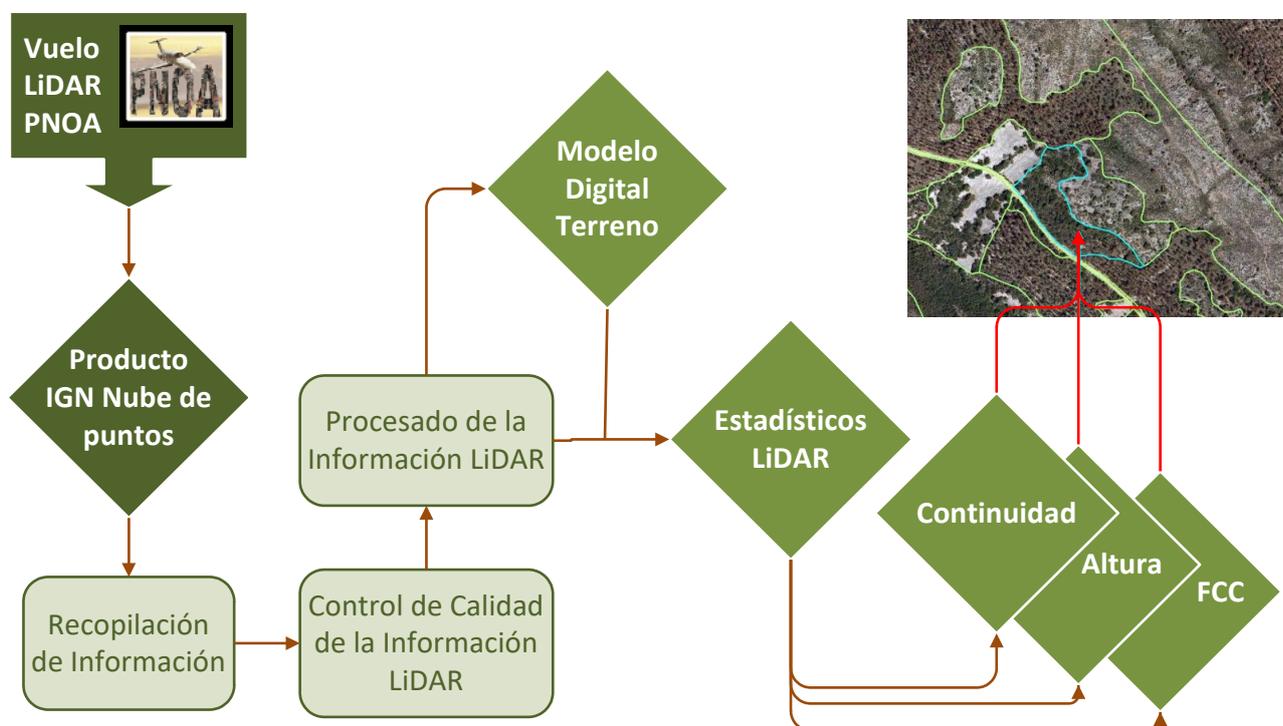


Figura1. Flujo de trabajo para el procesado de los datos LiDAR orientado a caracterizar la estructura de vegetación

La recopilación de la información se realizó a partir de los límites oficiales de los parques nacionales, que el OAPN pone a disposición en la página web de la Red de Parques Nacionales, utilizando el centro de descargas del CNIG, salvo en el caso de los parques nacionales de Doñana, Sierra Nevada y el Archipiélago de Cabrera, para los que en el momento de la realización de los trabajos no estaban disponibles los productos finales del IGN, cuyos datos fueron solicitados directamente a este organismo.

En la tabla 1 se resumen los archivos LiDAR recopilados para cada uno de los parques nacionales estudiados:

Tabla 1. Bloques de datos LiDAR recopilados para los Parques Nacionales estudiados

Parque Nacional	Sistema de referencia	Cobertura LiDAR (Año del vuelo y Lote)
P.N. de Aigüestortes i Estany de Sant Maurici	ETRS89 H31	PNOA_2011_Lote_CAT (62 archivos)
P.N. Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera	ETRS89 H31	PNOA_2014_BAL (13 archivos)
P.N. de Cabañeros	ETRS89 H30	PNOA_2009_Lote7_CLM (153 archivos)

Parque Nacional	Sistema de referencia	Cobertura LiDAR (Año del vuelo y Lote)
		PNOA_2010_Lote8_EXT (9 archivos)
P.N. de la Caldera de Taburiente	REGCAN95	PNOA_2009_Lote_CAN-Pal (21 archivos)
P.N. de Doñana	ETRS89 H29	PNOA_2014_AND-NW (173 archivos)
P.N. de Garajonay	REGCAN95	PNOA_2009_Lote_CAN-Gom (22 archivos)
P.N. Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia	ETRS89 H29	PNOA_2010_Lote10_GAL (29 archivos)
P.N. de Monfragüe	ETRS89 H30	PNOA_2010_Lote8_EXT (92 archivos) DIFERENTES HUSOS
P.N. de Ordesa y Monte Perdido	ETRS89 H31	PNOA_2010_LOTE1_ARA-NORTE (73 archivos) DIFERENTES HUSOS
P.N. de los Picos de Europa	ETRS89 H30	PNOA_2010_LOTE4_CYL (104 archivos) PNOA_2010_Lote5_CYL-RIO (72 archivos) PNOA_2012_LOTE_AST (199 archivos) PNOA_2012_LOTE_CANT (2 archivos)
P.N. de la Sierra de Guadarrama	ETRS89 H30	PNOA_2010_Lote7_CYL-MAD (160 archivos)
P.N. de Sierra Nevada	ETRS89 H30	PNOA_2014_AND-NE (161 archivos) PNOA_2014_AND-SE (228 archivos)
P.N. de las Tablas de Daimiel	ETRS89 H30	PNOA_2009_Lote7_CLM (21 archivos)
P.N. del Teide	REGCAN95	PNOA_2009_Lote_CAN-Ten (71 archivos)
P.N. de Timanfaya	REGCAN95	PNOA_2009_Lote_CAN-Lan (24 archivos)

En aquellos parques nacionales en los que hay archivos duplicados procedentes de distintos vuelos del PNOA, se priorizó sistemáticamente la utilización de los archivos más recientes siempre y cuando la información del bloque estuviera completa, y en caso contrario se seleccionaron los bloques completos.

Recopilada la información, el siguiente paso fue el control de calidad de los archivos LAS para verificar que estaban completos y clasificados. La clasificación de la nube de puntos es un paso fundamental del proceso ya que permite diferenciar los retornos de suelo de los de vegetación, edificios u otras infraestructuras, y seleccionar así para el análisis la información correspondiente a la vegetación. Aunque los productos generados por el PNOA tienen una fiabilidad muy razonable, en situaciones puntuales los clasificadores semiautomáticos que usan pueden dar lugar a errores de clasificación, que si no se tienen en cuenta pueden suponer errores en la interpretación de los datos. Este problema es generalizado en todos los parques y especialmente notable allí donde el relieve es abrupto (fuertes pendientes y cortados), lo que acontece con frecuencia en los parques de montaña y los acantilados de los parques costeros.

Dado que la reclasificación manual de los datos es un trabajo ingente fuera del alcance de este estudio, se establecieron diferentes medidas de mejora de los datos. Se reclasificaron los datos de los parques nacionales de Sierra Nevada y Teide, que presentaban algunos errores sistemáticos de clasificación en las zonas de solape, con la herramienta LASGROUND, perteneciente al paquete de herramientas de Lastools (Lastools, 2016). Por otro lado, una vez finalizados estos trabajos fue necesaria una revisión manual de los resultados obtenidos.

Para toda la superficie de estudio se han procesado las nubes de puntos finalmente seleccionadas de cara a obtener distintas variables fisiográficas del terreno, así como una serie de estadísticos que caracterizan las masas forestales de los parques nacionales en los siguientes estratos:

- Vegetación media: de 0,5 - 2 m, asimilable a matorral
- Vegetación media-alta: de 2 - 4 m, asimilable al estrato arbustivo
- Vegetación alta: > 4 m, asimilable al bosque, o estrato arbóreo

Según las recomendaciones bibliográficas (Maltamo, et al 2005), se descartó trabajar con el estrato de vegetación baja por debajo de 0,5 m, asimilable a pastizal, con objeto de evitar incorporar puntos de suelo a la vegetación.

Para el tratamiento de los datos LiDAR se ha seguido una metodología propia de Agresta Sociedad Cooperativa que, combinando FUSION (McGaughey, 2014) y desarrollos propios orientados a gestionar la información en grandes superficies e incorporarla a los SIG convencionales, permite abordar el análisis de la ingente cantidad de información contenida en los datos LIDAR a escala regional. FUSION es un software de libre acceso desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (US Forest Service – Department of Agriculture) con objeto de ayudar a los investigadores a entender, explorar y analizar los datos LIDAR.

Para el tratamiento de los datos LiDAR se han seguido las siguientes fases:

- I. Generación de los modelos digitales del terreno: Se han generado un modelo digital de elevaciones (MDE) de 2 metros de paso de malla a partir de los retornos clasificados como suelo.
- II. Normalización de los retornos procedentes de la vegetación: los MDE generados se han utilizado para normalizar las nubes de puntos, es decir, transformar la elevación de cada uno de los retornos en alturas sobre el suelo (altura de la vegetación).
- III. Cálculo de estadísticos de los retornos de vegetación en celdas de 25 metros de lado: se han calculado los estadísticos de elevaciones y coberturas de los puntos LiDAR clasificados como vegetación para cada uno de los tres estratos objetivo: vegetación media, vegetación media-alta y vegetación alta.

Se ha generado una batería de 70 estadísticos de la nube de puntos LiDAR que caracterizan alturas y coberturas de la vegetación. De entre todos, se han seleccionado 3 estadísticos que caracterizan singularmente la estructura de la vegetación:

- **Altura media de la vegetación por estrato:** Se ha calculado la altura media por cada uno de los estratos de vegetación establecidos por celda.
- **Fracción de Cabida Cubierta (FCC):** La fracción de cabida cubierta viene calculada como el porcentaje de primeros retornos LiDAR que quedan capturados por la vegetación en el estrato analizado por celda.

- **Canopy relief ratio (CRR):** el CRR se utiliza para analizar la continuidad y complejidad de la estructura vertical de la vegetación, es un estadístico relacionado con la longitud libre de copa de la masa a partir de observaciones de las alturas (Parker y Russ, 2004) y se define como:

$$CRR = \frac{(H_{media} - H_{mínima})}{(H_{máximo} - H_{mínima})}$$

Este parámetro, cuyo valor está entre 0 y 1, refleja la estructura vertical de la biomasa vegetal. Valores menores de 0,5 indican que la mayor parte de la biomasa está en las partes bajas, mientras que valores mayores de 0,5 indican que la mayor parte de la biomasa está en las partes altas del estrato analizado.

Para la caracterización de las teselas de los sistemas naturales de vegetación a partir de las 9 capas ráster de 25x25 m de estos estadísticos (3 por estrato), se calculó la media por tesela, estadístico y estrato.

- IV. Incorporación de esta información LIDAR por tesela a las geodatabases de la cartografía de sistemas naturales para cada parque nacional: Se incluyó en dichas GDB una tabla con la información LIDAR, y una clase de relación de esta tabla con la capa de teselas (1 a 1 según el campo ID_tesela de la geodatabase).
- V. Revisión manual de los resultados obtenidos. Con objeto de detectar posibles problemas de clasificación de los datos LiDAR, que pudieran haber repercutido en errores en los resultados obtenidos, se han revisado parque por parque los cálculos por expertos conocedores de los mismos, editando de forma manual aquellas teselas en las que se ha observado cualquier error, ajustando los resultados obtenidos en función de la realidad de cada sistema natural con apoyo de ortofoto. Se analizaron 47.875 teselas corrigiéndose 11.387, el 23,78 % de las mismas, la mayor parte de las cuales correspondieron a problemas derivados de errores en la clasificación del LiDAR. Cabe destacar que fue necesario corregir las teselas del Parque Nacional de Garajonay quemadas en el incendio del verano de 2012, posterior a la fecha del vuelo analizado (2009).

En el Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, esta problemática tiene una especial relevancia en el área de “La Pedriza del Manzanares”, donde la abundancia de rocas entremezcladas con la vegetación, genera numerosos errores en la clasificación de los datos LiDAR. En esta zona concreta se ha ensayado la mejora de los resultados obtenidos mediante teledetección. Para ello se ha generado una máscara de zonas sin respuesta fotosintética obtenida a partir de una clasificación supervisada usando técnicas de aprendizaje automático con Randonforest (Breiman; 2001), que utilizan las respuestas del índice NDVI calculado a partir de imágenes Sentinel 2 en zonas de entrenamiento conocidas para predecir la presencia o ausencia de respuesta fotosintética en el resto de la superficie de estudio. Esta máscara ha permitido establecer un factor de corrección para solventar los problemas de sobreestimación de fracción de cubierta cubierta, fundamentalmente de matorral, en las teselas de la pedriza.

4. Resultados

El resultado principal del presente trabajo ha sido dotar a la cartografía de sistemas naturales de vegetación desarrollada por parte del Organismo Autónomo de Parques Nacionales para todos los

parques de la Red de información relativa a la estructura de la vegetación diferenciada en los tres estratos contemplados.

Las geodatabases de sistemas naturales de vegetación de cada parque han sido enriquecidas con los valores medios por tesela de altura media de la vegetación, FCC y CRR para los tres estratos analizados (matorral, estrato arbustivo y arbolado). Los valores resultantes se han integrado en las mismas a través de dos tablas que recogen los datos procedentes del procesado LiDAR para cada tesela, (una para los resultados previos a la revisión y otra para los resultados finales revisados).

Esta información establece una base de referencia sobre el estado de la estructura de la vegetación en los sistemas naturales de vegetación, que va a permitir a través del análisis de futuros vuelos LiDAR la evaluación de la evolución de esta estructura, en consonancia con el objetivo de seguimiento general de la Red de Parques Nacionales.

Por otra parte, la aplicación de la tecnología LIDAR al seguimiento de la estructura de los ecosistemas ha permitido obtener una serie de resultados que complementan el producto principal, poniendo en valor los datos LiDAR de la Red de Parques Nacionales tanto para su uso a nivel de gestión como de investigación. Entre los subproductos más significativos desarrollados para cada parque en este proyecto se encuentran:

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de paso de malla de 2 m (Figura 2).
- Bloque de 70 Estadísticos LIDAR disponibles en formato vectorial (formato shp, celda 25 m) para los tres estratos de vegetación considerados en bloques de 2x2 km correspondientes a los bloques LAS, disponibles con fines de investigación.
- Modelo Digital de Fracción de Cobertura por estrato (paso de malla de 25 m).
- Modelo Digital de altura media por estrato (paso de malla de 25 m).
- Modelo Digital de CRR por estrato (paso de malla de 25 m).

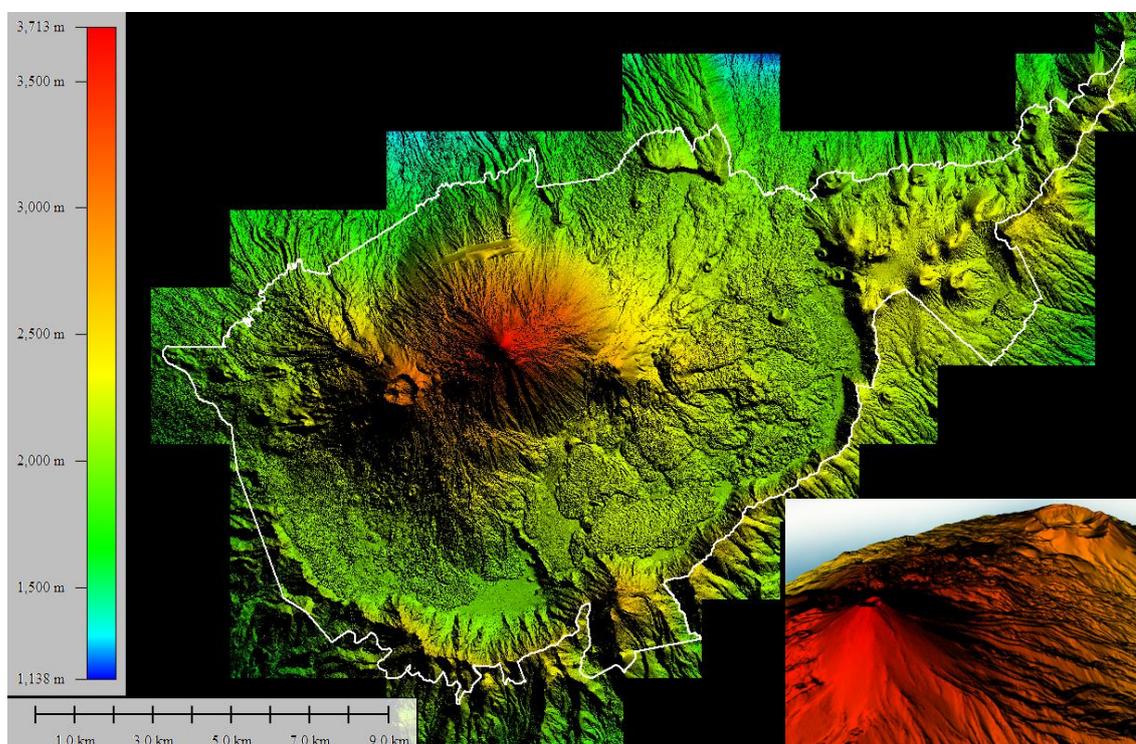


Figura 2. MDE resultante para el Parque Nacional del Teide y detalle en 3D del Pico del Teide

5. Discusión

El uso de la tecnología LiDAR para el análisis de la estructura de la vegetación permite generar información útil para multitud de campos de interés forestal. Su utilización está muy extendida en distintos ámbitos de la ingeniería forestal, desde la generación de mapas de modelos de combustible orientados a mejorar la planificación de silvicultura preventiva y gestión de los incendios (Gonzalez-Olabarria et al, 2012; Marino et al, 2016), estimación de biomasa y sumideros de carbono (García et al., 2009), hasta el inventario forestal (Hyypä et al 2008; Rodríguez et al 2014) pasando por el análisis de crecimientos (Yu et al; 2004).

Paralelamente, en los últimos años se han empezado a desarrollar multitud de estudios basados en datos LiDAR orientados al seguimiento y conservación de hábitats, con aplicaciones tan variadas como son los índices de calidad de ribera (Magdaleno et al, 2010), la conectividad de hábitats de especies como el oso pardo (Mateo-Sánchez, et al; 2015), la detección de madera muerta (Kim, et al; 2009) y, en combinación con otros sensores, en la propia conservación y el análisis de hábitats (Mundt et al; 2006).

España es un país privilegiado para trabajar a este nivel, ya que tiene la enorme ventaja de disponer de una cobertura completa de LiDAR ejecutada entre los años 2009 y 2015, y de estar en proceso de ejecución de la segunda cobertura. La primera cobertura fue desarrollada originalmente al detectarse la necesidad de obtener modelos digitales de alta precisión para tener una buena base para el desarrollo de cartografía de zonas inundables. Sin embargo, actualmente está siendo utilizada para múltiples propósitos entre los que destaca la caracterización de estructuras de vegetación.

En la actualidad, se está desarrollando la segunda cobertura del PNOA, que tiene la intención de alcanzar una periodicidad sexenal, habiéndose volado en la actualidad cerca del 20 % del territorio nacional (más de 95.000 km²). Esta segunda cobertura abre el camino a una nueva posibilidad de estudio de las masas forestales por comparación de coberturas LiDAR, lo que aumenta el interés de esta herramienta para la detección de cambios y el seguimiento del estado de los sistemas naturales de vegetación. El elevado coste de los vuelos LiDAR supone que hay escasas experiencias de análisis de seguimiento de la evaluación de la vegetación a partir de comparación entre vuelos. No obstante, existen experiencias muy interesantes que demuestran su gran potencial a la hora de analizar cambios en el territorio, tanto en entornos urbanos (Chen y Lin; 2010) como forestales, habiendo sido utilizadas para detectar cortas (Yu et al; 2004), cambios en la vegetación (Nyström et al, 2012) y crecimientos (Hopkinson et al; 2008).

La existencia de un proyecto piloto para la detección de cambios en el territorio utilizando LiDAR en Canarias, en el marco del cual la empresa pública GRAFCAN vuela la superficie de las islas con una densidad de 1 pulso/m² periódicamente desde el año 2010 (Rosales y Rodrigo 2012), ha permitido aprovechar este potencial para el análisis del impacto y la recuperación del incendio de 2012 en el Parque Nacional de Garajonay en la isla de la Gomera (Guillén-Climent, et al. 2015, 2017; Marino et al. 2017).

Por tanto, la apuesta del IGN para completar una segura cobertura LiDAR en España e integrar estos vuelos dentro de la planificación periódica del PNOA supone una enorme oportunidad para mejorar los trabajos de seguimiento de las masas forestales, y en particular para el estudio de la estructura de la vegetación en espacios naturales protegidos como los parques nacionales. Esto tiene una especial relevancia en un momento en el que queda patente la necesidad de desarrollar metodologías que nos permitan monitorizar el estado de conservación de los hábitats pertenecientes a la Red Natura 2000. El Plan Director de la Red de Parques Nacionales (Real Decreto 389/2016, de 22 de octubre) establece que al menos se aplicarán para la Red de Parques Nacionales (que constituye una aportación relevante a la Red Natura 2000 española), los parámetros descriptivos y valores de referencia del buen estado de conservación establecidos para la Red Natura 2000.

Es de vital importancia que desde el sector forestal se continúe dando uso a estos datos LIDAR e, incidiendo en la importancia y el potencial de los mismos, se trabaje para que se tengan en cuenta los requerimientos forestales en la configuración de futuros vuelos LiDAR del PNOA, poniéndolos en valor. Todo ello contribuirá a justificar la actualización de los datos con una periodicidad razonable que permita utilizarlos como base para el análisis de la evolución de la vegetación de nuestros sistemas naturales.

6. Conclusiones

La disponibilidad de distintas coberturas de vuelos LiDAR en España dentro del PNOA en España abre un nuevo abanico de posibilidades en el estudio de la evolución temporal de los ecosistemas forestales por comparación de coberturas. Nos encontramos en un momento de inflexión a la hora de abordar los trabajos con datos LiDAR ya que pasamos de disponer de una imagen puntual, muy fiable y de gran calidad, de cómo era tanto la vegetación como la morfología del terreno en la fecha de captura de los mismos, a la posibilidad de analizar cambios entre dos fechas de vuelos. Esto refuerza la apuesta que ha hecho el OAPN para aplicar la tecnología LiDAR al estudio de los sistemas naturales de vegetación, para obtener indicadores en el marco del sistema de seguimiento ecológico en la Red de Parques Nacionales.

El presente trabajo sienta las bases para un seguimiento dinámico de los sistemas naturales de vegetación estableciendo una “foto” de referencia del estado de la estructura de vegetación de los sistemas naturales en la Red (alturas, coberturas y estratificación de los distintos estratos de vegetación en cada uno de los sistemas naturales), cuya evolución se analizará a partir de los datos de futuros vuelos LiDAR. El análisis de la evaluación de la estructura de la vegetación utilizando datos LiDAR supone un enfoque novedoso a la hora de abordar el seguimiento en la Red de Parques Nacionales, que genera además productos útiles para la gestión y la investigación en estos espacios protegidos.

El aumento de la capacidad de computación de los ordenadores, la disponibilidad de datos públicos en abierto y la existencia de metodologías para trabajo en grandes superficies como las utilizadas en este proyecto, hacen posible pensar en que estas metodologías puedan ser aplicables para el seguimiento continuo y general de la estructura de los sistemas naturales de la Red de Parques Nacionales en el futuro, así como ser exportadas para el análisis de otros espacios naturales protegidos y hábitats de la Red Natura 2000. La combinación de esta información de estructura de vegetación con otras fuentes de datos, como sensores multiespectrales satelitales que nos aporten información de la composición y el funcionamiento de los sistemas naturales, puede suponer una oportunidad para la monitorización del estado de conservación de los sistemas naturales y hábitats, dando respuesta a uno de los principales retos de gestión relacionados con la Red de Parques Nacionales y la Red Natura 2000.

7. Agradecimientos

Desde el equipo redactor de este artículo queremos agradecer especialmente su colaboración al IGN y en particular a Juan Carlos Ojeda Manríquez por sus desvelos para proporcionarnos los datos según estaban disponibles. Por otro lado no queremos olvidarnos de todos los miembros del Grupo de Trabajo de Seguimiento de la Red de Parques Nacionales ni de todo el resto de profesionales que trabajan en el seguimiento de los Parques Nacionales contribuyendo a la conservación de los mismos.

8. Bibliografía

BREIMAN, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45, 5-32.

ESPAÑA 2014. Ley 30/2014, de 30 de noviembre, de Parques Nacionales. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 293 de 4 de diciembre de 2014.

ESPAÑA 2016. Real Decreto 389/2016, de 22 de octubre, por el que se aprueba el Plan Director de la Red de Parques Nacionales. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 257 24 de octubre de 2016.

GUILLEN-CLIMENT, M.L.; FERNANDEZ-LANDA, A.; TOMÉ, J.L.; RANZ, P.; (2015). Análisis del estado de masas forestales quemadas en el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera) mediante uso de técnicas de teledetección, sensores ópticos y LiDAR. Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección, 439-442.

GUILLÉN-CLIMENT, M.; MARINO, E.; RANZ, P.; TOMÉ, J.L.; 2017. Clasificación del estado de la vegetación tras incendio en el P.N. de Garajonay a partir de datos de intensidad LiDAR e imágenes satelitales. 7º Congreso Forestal Español, 26-30 junio, Plasencia.

GARCÍA, M.; RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; DANSON, F.M.; 2009. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment* 114, 816–830.

GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.; RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; MOLA-YUDEGO, B.; 2012. Mapping fire risk in the model forest of Urbión based on airborne LIDAR measurements. *Forest Ecology and Management*, 282: 149-156.

HYPPÄ, J., HYPPÄ, H., LECKIE, D., GOUGEON, F., YU, X. Y MALTAMO, M.; 2008. Review of methods of smallfootprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29 (5), pp. 1339-1366.

HOPKINSON, C.; CHASMER, L.; HALL, R.J.; (2008) The uncertainty in conifer plantation growth prediction from multi-temporal lidar datasets. *Remote Sensing of Environment* 112:1168–1180.

KIM Y, YANG Z, COHEN WB, PFLUGMACHER D, LAUVER CL, VANKAT JL (2009) Distinguishing between live and dead standing tree biomass on the North Rim of Grand Canyon National Park, USA using small-footprint lidar data. *Remote Sensing of Environment* 113:2499–2510.

LAStools website <http://cs.unc.edu/~isenburg/lastools/> (verified in January 2017).

LIANG-CHIEN CHEN AND LI-JER LIN (2010). "Detection of building changes from aerial images and light detection and ranging (LIDAR) data", *J. Appl. Remote Sens.* 4(1), 041870.

MACGAUGHEY, R.J.; 2014. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. VER 2.90. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, University of Washington. 159 p Seattle.

MAGDALENO, F.; MARTÍNEZ, R.; ROCH, V.; 2010. Índice RFV para la valoración del estado del bosque de ribera. *Ingeniería Civil* 157: 85-96.

MALTAMO, M., PACKALEN, P., YU, X., EERIKAINEN, K., HYYPPÄ, J., & PITKANEN, J. (2005). Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, 216, 41–50.

MARINO E., RANZ P., TOMÉ J.L., NORIEGA M.A., ESTEBAN J., MADRIGAL J. (2016). Generation of high-resolution fuel model maps from discrete airborne laser scanner and Landsat-8 OLI: a low-cost and highly updated methodology for large areas. *Remote Sensing of Environment*, Volume 187, 15 December 2016, Pages 267–280.

MARINO, E.; RANZ, P.; TOMÉ, J.L.; 2017. Evolución post-incendio de la estructura de la vegetación en el PN de Garajonay a partir de datos LIDAR. 7º Congreso Forestal Español, 26-30 junio, Plasencia.

MATEO-SÁNCHEZ, M.C., GASTÓN, A., CIUDAD, C., GARCÍA-VIÑAS, J.I., CUEVAS, J., LÓPEZ-LEIVA, C., FERNÁNDEZ-LANDA, A., ALGEET-ABARQUERO, N., MARCHAMALO, M., FORTIN, M-J. & SAURA, S. 2015. Seasonal and temporal changes in species use of the landscape: how do they impact the inferences from multi-scale habitat modeling? *Landscape Ecology* 31: 1261–1276.

MUNDT, J. T., STREUTKER, D. R. Y GLENN, N. F.; 2006. Mapping sagebrush distribution using fusion of hyperspectral and LiDAR classifications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 72 (1), pp. 47-54.

NYSTRÖM, M.; HOLMGREM, J. & OLSSON, H.; (2012) Change detection of mountain birch using multi-temporal ALS point clouds. *Remote Sensing Letters* 4 (2), 190-199.

PARKER, G.G., RUSS, M.E., 2004. The canopy surface and stand development: assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry. *For. Ecol. Manag.* 189, 307–315.

RODRIGUEZ, F.; FERNANDEZ-LANDA, A. Y TOME, J; 2014. Resultados y reflexiones tras cinco años de inventario forestal con tecnología LiDAR. *Foresta* 61: 28-33.

ROSALES, J.J. y RODRIGO, J.J.; 2012. Tecnología LiDAR aplicada a la gestión del territorio. *Tierra y Tecnología*, nº 41: 57-59.

TRAGSATEC. 2010. *Desarrollo de la cartografía de los sistemas naturales de Monfragüe*. Área de Recursos Patrimoniales. OAPN. MAGRAMA.

TRAGSATEC. 2013. *Cartografía general de los sistemas naturales de la Red de Parques Nacionales*. Área de Seguimiento de Recursos y Programas Centralizados. OAPN. MAGRAMA.

YU, X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H. Y MALTAMO, M.; 2004. Measuring the growth of individual trees using multi-temporal airborne laser scanning point clouds. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*, pp 204-208.

YU, X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., MALTAMO, M., 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sens. Environ.* 90 (4), 451–462.