



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

Obtención de variables forestales mediante LiDAR
para el cálculo de riesgo de incendios en el
Principado de Asturias

Trabajo fin de máster

Alejandro Gayo Peláez

Julio 2019



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

*Máster en Geotecnología y
Desarrollo de Proyectos SIG*

**Obtención de variables forestales mediante LiDAR
para el cálculo de riesgo de incendios en el
Principado de Asturias**

Trabajo fin de máster

Alejandro Gayo Peláez

Tutores:

Carlos Antonio López Sánchez - Arturo Colina Vuelta

Julio 2019



Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas y cada una de las personas que me han apoyado durante mi etapa académica que hoy culmina con la presentación de este trabajo.

*Lo único que tenía claro a la hora de escribir estos agradecimientos era resaltar a mis familiares: a mi **padre**, a mi **madre**, a mi **hermano** y a mis **abuelos** que tanto tiempo han invertido en mí. Hoy más que nadie sienten haber cumplido uno de sus mayores retos. Lo que no saben ellos es que son mi mayor motivo de orgullo y que les estaré eternamente agradecidos. Gracias mamá, papá e Ignacio por hacerme ser como soy.*

*También quiero agradecer al **Dr. Arturo Colina Vuelta** la oportunidad de integrarme en el equipo de su área de investigación del INDUROT, siempre guiándome por el camino correcto y corrigiéndome en el momento adecuado, haciendo que este trabajo fuese presentado. De igual modo, quiero agradecer al **Dr. Carlos Antonio López Sánchez**, del área de ingeniería agroforestal de la Escuela, ya que siempre ha aportado su conocimiento técnico y científico al trabajo, resolviendo muchas de las incógnitas de la manera más eficiente posible y transmitiendo la pasión necesaria para que tras un periplo de seis meses este trabajo llegase a su fin.*

*No me puedo olvidar de mis compañeros/as de área, pero en especial de la futura **Dra. Lorena Salgado Fernández**, la cual, en muchas ocasiones ha sabido responder preguntas sin respuesta, y ha sabido darme el impulso, los consejos y los ánimos necesarios que muchas veces uno necesita. Gracias Lorena por hacer de esta estancia un período de aprendizaje continuo y enseñarme que incluso en los malos momentos hay que saber reír. Siempre nos quedarán nuestros “cachos”.*

*Por último, quiero agradecer a mis **amigos** de Erasmus y a mis **amigos** de Tineo el apoyo y la confianza, tanto a distancia como presencial que hacen de los momentos menos buenos, los mejores.*

“Haga lo que hagan, hagan lo que aman”

Alejandro Gayo Peláez (julio 2019)

Resumen

El uso de datos provenientes de sensores Escáner Láser Aerotransportados (*ALS* siglas en inglés), o LiDAR (acrónimo de *Light Detection and Ranging*) ha tomado un auge durante los últimos años. Esto es debido a la gran utilidad que presenta esta herramienta tecnológica para la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) de alta resolución y la gran utilidad de estos modelos en varios ámbitos de aplicación, como la generación de modelos tridimensionales urbanos, hasta la planificación y prevención de riesgos en caso de un desastre natural (Fernández y Siabato, 2011).

El planteamiento inicial de este trabajo se centra en generar una cartografía base que defina la estructura de la biomasa existente en el Principado de Asturias, la cual podrá ser integrada en Planes de Prevención contra incendios forestales.

El flujo de trabajo se acometerá teniendo como base los datos LiDAR pertenecientes al Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del año 2012 a los que se les aplicarán diferentes procesos que permitan conocer las diferentes estadísticas de cada estrato, con las que se creará la cartografía más precisa para el análisis de los resultados.

El objetivo principal pretende evaluar la adecuación y las posibles aplicaciones de los datos LiDAR ofrecidos por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) para la obtención de variables forestales en España.

Palabras Clave: LiDAR, PNOA, Sistema de Información Geográfica, variables forestales, modelos de combustible, prevención, riesgo de incendios.

Abstract

The use of data from Airborne Laser Scanner (ALS) sensors, or LiDAR (acronym for Light Detection and Ranging) has an impact in recent years. This is due to the great usefulness that this technological tool presents for the generation of Digital Elevation Models (MDE) of high resolution and the great utility of these models in several fields of application, such as the generation of urban three-dimensional models, up to the planning and prevention of risks in the event of a natural disaster (Fernández & Siabato, 2011).

The initial approach of this work focuses on creating a base cartography that defines the structure of the existing biomass in the Principality of Asturias, which can be integrated into Prevention Plans against forest fires.

The workflow will be based on the LiDAR data belonging to the National Aerial Orthophotography Plan (PNOA) of 2012, which will be applied to different processes that will allow to know the different statistics of each stratum, with which the cartography will be created more accurate for the analysis of the results.

The main aim of this work is to evaluate the suitability and possible applications of the LiDAR data offered by the National Aerial Orthophotography Plan (PNOA) to obtain forest variables in Spain.

Keywords: LiDAR, PNOA, Geographic Information System, forest variables, fuel models, prevention, fire risk.

Índice de abreviaturas

ALS – Escáner Láser Aerotransportado

ASCII – American Standard Code for Information Interchange

GIF – Gran incendio forestal (>500 ha)

GPS – Sistema de Posicionamiento Global

IGN – Instituto Geográfico Nacional

INDUROT - Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio

LAS – Log ASCII Standard

LiDAR – Light Detection and Ranging

MDE – Modelo Digital de Elevación

MDS – Modelo Digital de Superficie

MDT – Modelo digital del Terreno

PEIFOGA - Plan Especial de Protección Civil ante Emergencias Forestales de Galicia

PNOA – Plan Nacional de Ortofotografía Aérea

SHP – Shapefile

SIG – Sistema de Información Geográfica

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos y planteamiento del problema	7
3. Material y Métodos.....	9
3.1 Introducción	9
3.2 Fuentes de datos	12
La tecnología LiDAR	12
El LiDAR del PNOA	16
Otras fuentes de datos	19
3.3. Software utilizado.....	21
3.4 Procesado de datos LiDAR.....	23
Pre-procesado de datos LiDAR	23
Flujo de procesos en la generación de métricas LiDAR	27
3.5 Clasificación de los modelos de combustible	39
3.6 Generación de los modelos de combustible	41
Reglas de clasificación	41
Algoritmo de clasificación	44
4. Resultados y Discusión	46
4.1 Análisis del procesado de datos LiDAR.....	47
Generación del modelo digital del terreno	47
Análisis de las estadísticas resultantes de la obtención de métricas LiDAR	47
4.2 Análisis y validación de los modelos de combustible	55
4.2.1 Reglas de clasificación	55
4.2.2 Algoritmo de clasificación.....	57
4.3 Posibles líneas de mejora en la generación de modelos de combustible	59
5. Conclusiones	61
Referencias.....	63
Anexos	

Índice de tablas

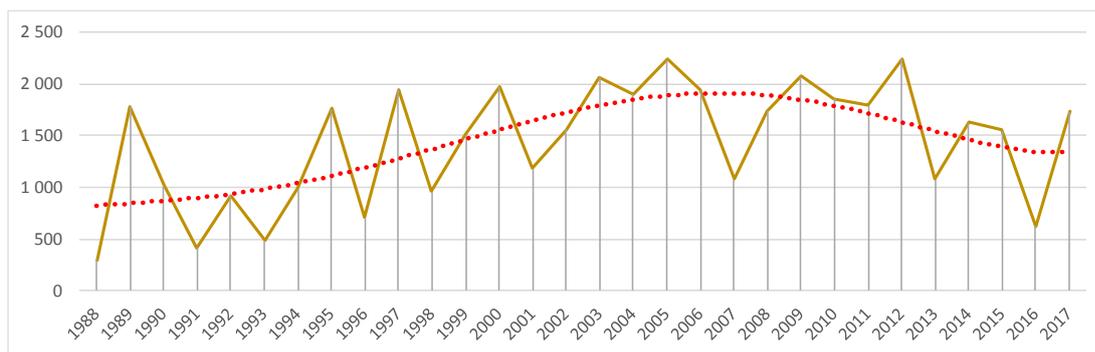
Tabla 1: Altura de vegetación por estratos (en m.).....	11
Tabla 2: Parámetros técnicos de adquisición de los datos LiDAR	17
Tabla 3: Historia de los IFN.....	20
Tabla 4: Parámetros g , w y sus iteraciones para el comando GroundFilter	30
Tabla 5: Parámetros técnicos de adquisición de los datos de obtención del MDT.....	31
Tabla 6: Métricas de elevación	36
Tabla 7: Estadísticas altura de la vegetación.....	49
Tabla 8: Estadísticas de la continuidad vertical del arbolado total	50
Tabla 9: Estadísticas de la fracción de cabida cubierta del arbolado.....	51
Tabla 10: Estadísticas de la fracción de cabida cubierta del matorral	52
Tabla 11: Estadísticas de la altura del arbolado en el percentil 95	53
Tabla 12: Estadísticas de la altura media del arbolado	54
Tabla 13: Matriz de confusión reglas de clasificación	56
Tabla 14: Matriz de confusión "Random Forest"	58

Índice de ilustraciones

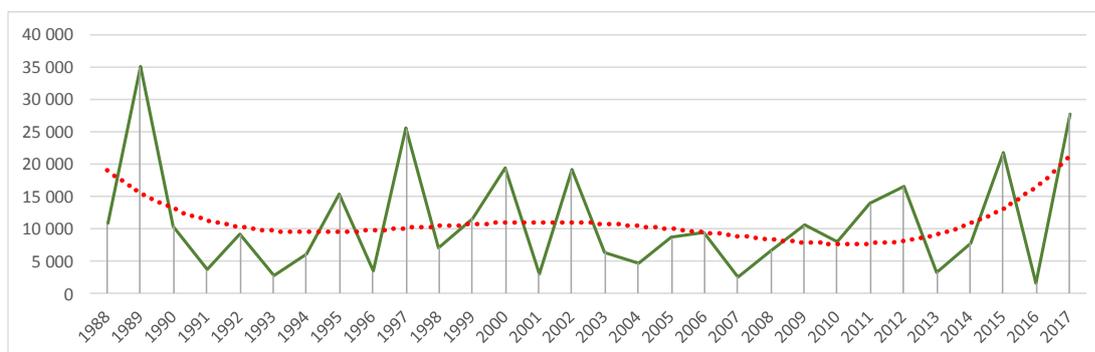
Ilustración 1: Asturias. Número de incendios.	1
Ilustración 2: Asturias. Superficie afectada (ha).....	1
Ilustración 3: Distribución de los incendios forestales en Asturias por quincenas	3
Ilustración 4: Localización del Principado de Asturias.....	9
Ilustración 5: Funcionamiento del vuelo LiDAR.....	15
Ilustración 6: Comportamiento del pulso láser en la vegetación.....	15
Ilustración 7: Densidad de pulsos/m ² LiDAR publicados en el PNOA por comunidades	18
Ilustración 8: Máxima actualidad LiDAR publicada en el PNOA por comunidades.	18
Ilustración 9: Coberturas LiDAR publicadas en el PNOA por comunidades	19
Ilustración 10: Diseño del muestreo de las variables medidas en campo (parcelas) en el IFN.....	21
Ilustración 11: Cuadrícula 1:10.000 del IGN dividida por husos	24
Ilustración 12: Malla LiDAR (2012) Asturias dividida por husos.....	24
Ilustración 13: Flujo de procesos.....	27
Ilustración 14: Funcionamiento de los parámetros gparam, wparam e iterations del comando GroundFilter de Fusion LiDAR Forestry	28
Ilustración 15: Asignación de pesos a cada retorno en función de valores de "g" y "w"	29
Ilustración 16: Tabla comparativa de los archivos generados a partir de los diferentes parámetros g, w e iterations	32
Ilustración 17: Normalización de la nube de puntos LiDAR	33
Ilustración 18: Comparación hoja 1:10 000 con buffer de 75 m. y 150 m.	37
Ilustración 19: Zonas combustibles y no combustibles del Principado de Asturias	38
Ilustración 20: Flujo de procesos para la clasificación de los modelos de combustible	42
Ilustración 21: Propuesta de clasificación de modelos de combustible a partir de datos de parcelas IFN y LiDAR	42
Ilustración 22: Parcelas IFN4	44
Ilustración 23: Altura de la vegetación.....	48
Ilustración 24: Continuidad vertical del arbolado total.....	50
Ilustración 25: Fracción de cabida cubierta del arbolado	51
Ilustración 26: Fracción de cabida cubierta del matorral.....	52
Ilustración 27: Altura del arbolado en el percentil 95.....	53
Ilustración 28: Altura media del arbolado.....	54
Ilustración 29: Resultados "Random Forest"	57

1. Introducción

El fenómeno de los incendios forestales en Asturias no es nuevo ya que la utilización del fuego como herramienta tradicional de gestión del territorio está muy arraigada en la región. Sin embargo, a pesar de los importantes esfuerzos de gestión, los importantes cambios en demográficos y económicos del medio rural asturiano han hecho de los incendios forestales uno de los problemas ambientales y socioeconómicos más graves de Asturias (Colina, 2018).



*Ilustración 1: Asturias. Número de incendios.
Fuente: Colina (2018)*



*Ilustración 2: Asturias. Superficie afectada (ha).
Fuente: Colina (2018)*

Si bien es cierto que el número se ha mantenido más o menos estable o incluso ha disminuido, la extensión, intensidad y severidad de estos ha incrementado notablemente, y especialmente en aquellos calificados como grandes incendios forestales (GIF) (Enríquez y Del Moral, 2012).

Se espera que esta situación empeore debido al futuro escenario del cambio climático con intervalos de incendios más largos y la acumulación de combustible forestal que harán estas áreas más vulnerables a los incendios forestales (Moritz *et al.*, 2012; San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2013).

Al cambio climático y usos del suelo comentados, se le suman otros factores como los agentes de ignición, la extensión de la temporada de fuegos, las características vegetales y la actividad humana, que, con las políticas del manejo del fuego y la fragmentación del paisaje, puede llegar a influir en gran medida en el régimen del fuego en el próximo siglo (Flannigan *et al.*, 2000).

Así este escenario futuro se explica en parte por las dinámicas que el medio rural asturiano ha experimentado desde las últimas décadas siglo XX dominadas por los procesos de despoblamiento del medio rural, de envejecimiento de su población o de cambio del modelo productivo agrario (Colina, 2018). Todo ello ha dado como resultado una merma en la capacidad de gestión del territorio por parte de las comunidades locales y el progresivo abandono de superficies agrarias consideradas marginales incrementado la biomasa en el monte y el potencial combustible para los incendios (Vélez 2000a).

Además, la vegetación que crece tras los incendios es, con frecuencia, altamente inflamable lo que, junto con la acumulación de combustible forestal (Moritz *et al.*, 2012; San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2013) y el incremento de superficies reforestadas con especies productivas, hacen que se incremente la probabilidad de grandes incendios forestales y la severidad de estos.

Si bien es cierto que los incendios forestales en nuestra región están presentes durante todo el año, la distribución temporal de los incendios en Asturias presenta notables diferencias con respecto a lo que ocurre en el conjunto del territorio español, donde en agosto se alcanza el máximo en número de siniestros, seguido de julio, septiembre.

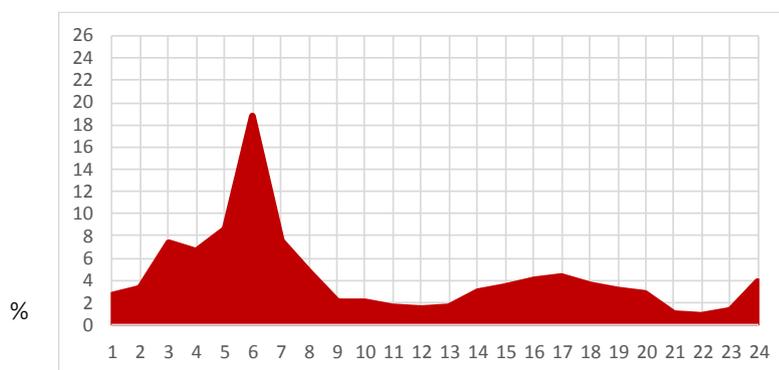


Ilustración 3: Distribución de los incendios forestales en Asturias por quincenas

Fuente: Colina (2018)

En Asturias esta distribución nacional se invierte con dos periodos en los que la frecuencia aumenta considerablemente debido a diversas razones, pero principalmente debido a prácticas agrarias para el mantenimiento de superficies de pastos. Más de la mitad de los incendios se producen entre los meses de febrero, marzo y abril, destacando la intensidad de la segunda quincena de marzo, en la que se registran más del 18 % de los siniestros anuales y más del 23 % de la superficie quemada. El segundo periodo crítico en la frecuencia anual de incendios se produce entre en los meses de agosto y octubre, en los que se registra algo más del 21 % de los siniestros (Colina, 2018).

Por esta y por muchas otras razones, el riesgo y ocurrencia por incendio forestal se está incrementando en muchas áreas forestales en las que nos encontramos, que tiene aun si cabe un mayor impacto por consecuencias

medioambientales, sociales y económicas (Moreira *et al.*, 2011; Moritz *et al.*, 2012; San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2013).

La conjunción de todas estas variables en nuestra región hace de esta una superficie altamente expuesta a la ocurrencia de incendios forestales, por lo que se hace innegable la necesidad de contar con una serie de medidas de prevención que permitan minimizar sus efectos e impactos sobre el territorio y la sociedad.

Si bien es cierto que la coordinación básica de las actividades de lucha contra incendios y del apoyo con medios de extinción corresponde al Estado, las competencias directas de prevención, extinción y vigilancia recaen sobre las comunidades autónomas. En el ámbito de la protección civil es la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil de Emergencia por incendios forestales la que, desde 1984, regula la planificación de los planes para dar respuesta, a distintos niveles (estatal, autonómico y local) a las emergencias en esta materia¹.

Atendiendo a las obligaciones derivadas de la citada normativa el Principado de Asturias elabora en 2001 el Plan Especial de Protección Civil sobre Riesgo de Incendios Forestales, el cual ha sufrido diversas revisiones y actualizaciones, la última en 2014-2017². Este plan, conocido como INFOPA, tiene como propósito regular la organización, los procedimientos de acción y el uso, la coordinación y la movilización de los medios y recursos que pertenecen a la comunidad autónoma, así como aquellos que pueden ser asignados por otras administraciones públicas o privadas. Para ello se elabora un mapa de riesgo a partir del cual se realiza la zonificación del territorio en función del riesgo y de las previsibles consecuencias de los incendios forestales. Esta zonificación tiene por objeto determinar los medios y recursos de que se debe disponer para actuar ante una emergencia, así como su distribución en el territorio.

¹ La Directriz básica de planificación de protección civil de emergencia por incendios forestales vigente fue aprobada por Real Decreto 893/2013, de 15 de noviembre (BOE, núm.293, de 7 de diciembre de 2013).

² El vigente INFOPA fue aprobado por Acuerdo de 20 de diciembre de 2017, del Consejo de Gobierno, BOPA núm. 299, de 29 de diciembre de 2017).

Con todo ello se pretende que las acciones contra incendios forestales no sean resultado de la improvisación, sino que estén perfectamente definidas, planificadas y coordinadas.

En este contexto, y dado que la biomasa es uno de los principales factores que afectan al riesgo y comportamiento del fuego, la caracterización y conocimiento del combustible presente en el territorio se convierte un elemento clave para la planificación de la prevención y la extinción de los incendios (Erdody y Moskal, 2010; Seielstad y Queen, 2003), en particular, para la disminución de la probabilidad de ocurrencia de GIF. Sin embargo, tradicionalmente la cartografía del combustible es muy costosa ya que consume mucho tiempo y recursos, por lo que en muchas ocasiones esta información no está disponible o, en el mejor de los casos, está desactualizada, lo que dificulta la obtención de informaciones precisas de riesgo de incendios forestales y hace que los trabajos pierdan el valor que realmente pudieran alcanzar.

Es por esto por lo que, a través de este estudio, se intenta crear un modelo de trabajo adaptado al ámbito regional objeto de estudio, que permita calcular variables descriptivas de las diversas estructuras forestales presentes en el territorio asturiano, tanto para el estrato arbóreo como para el matorral, a través del aprovechamiento de datos LiDAR disponibles en el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del Instituto Geográfico Nacional.

2. Objetivos y planteamiento del problema

El objetivo general del presente trabajo es: establecer los procedimientos necesarios para el tratamiento masivo de los datos LiDAR para el conjunto de Asturias obteniendo coberturas continuas de las variables forestales de interés para la valoración del riesgo de incendio forestal en la región.

Además, con el presente trabajo se pretende contribuir a:

- Identificar el potencial de la tecnología Airborne Laser Scanning (ALS) en el ámbito de la planificación frente a los incendios forestales.
- Generar una cobertura de modelos de combustible, mediante la clasificación supervisada de variables forestales a partir de nubes de puntos tridimensionales del proyecto PNOA-LiDAR y parcelas de entrenamiento correspondientes al cuarto inventario forestal nacional (IFN4) que permita elaborar una cartografía detallada y actualizable del conjunto de la región.
- Mostrar las posibilidades que para un territorio como asturiano tiene el tratamiento de los datos LiDAR para obtener variables de utilidad el análisis de procesos los ambientales a escala regional.

Como ya hemos señalado los incendios forestales constituyen uno de los principales problemas ambientales y socioeconómicos que soporta nuestra comunidad autónoma y una gravísima amenaza para el mantenimiento de nuestros niveles de calidad ambiental y, por tanto, de nuestra forma de vida.

Al contrario que otras comunidades autónomas como el País Vasco o Cataluña, el Principado de Asturias no dispone de este tipo de información en materia de variables forestales que caractericen la vegetación y los modelos de combustibles existentes en el territorio. A pesar de que los datos LiDAR son gratuitos y están a

disposición de cualquier agente para ser consultados, su tratamiento presenta una ardua tarea en materia de aprovechamiento.

El tratamiento de un volumen masivo de datos, la extracción de las distintas variables y cálculo de estadísticas hacen que esta información aun siendo gratuita, tenga unos elevados costes en materia de tiempo de procesado y ejecución. Sin embargo, las nuevas metodologías reflejan la eficacia del uso de esta técnica para el conocimiento y la localización de los modelos de combustible presentes en el territorio, convirtiéndose en un elemento clave para la planificación de la prevención y la extinción de los incendios forestales. Para ello, a lo largo del trabajo y aprovechando los conceptos y conocimientos adquiridos en la formación de máster, se aplican diferentes técnicas y herramientas que nos permitan cumplir con los objetivos establecidos. De esta forma se realiza una propuesta metodológica donde se conjuga la tecnología más eficiente de la que se dispone para cada proceso, aumentando el rendimiento de cada tarea en función de las herramientas que se conocen.

3. Material y Métodos

3.1 Introducción

Para poder llevar a cabo una demostración de la gran utilidad que tienen los datos LiDAR – ALS en el sector forestal, y más concretamente para la lucha y prevención de incendios forestales, se ha tomado como área de estudio la totalidad del Principado de Asturias (España).



Ilustración 4: Localización del Principado de Asturias

Fuente: Elaboración propia

Como se lleva diciendo a lo largo de toda la investigación, para poder estimar el riesgo se han tenido que analizar y tratar, mediante varios procesos, las nubes (datos) obtenidas en bruto, del PNOA-LiDAR. Para ello, como también se ha dicho, se

han utilizado distintas herramientas (*Python*, **.bat*, *Model Builder*, etc.), tanto libres como comerciales, que proporcionasen bases y estadísticas sobre las que establecer las estrategias y zonificaciones correspondientes y permitan ejecutar los procesos de la forma más eficiente posible.

A través del tratamiento de los datos LiDAR se obtienen diversas variables con diferentes intereses. En este caso, se obtendrán aquellas variables que nos permitan, más adelante, hacer una clasificación de la cobertura vegetal del suelo (modelos de combustible): altura media y fracción de cabida cubierta tanto para el arbolado como para el matorral. Junto con estas, se calcularán otras variables forestales de interés para distintos procedimientos ambientales y útiles para la planificación y prevención contra incendios, como son las alturas dominantes en el percentil 90 y 95, y las alturas medias, máximas y mínimas tanto para el matorral como para el estrato arbolado. Por último, se obtendrá, para el arbolado total, la altura media, máxima y mínima. Con el cálculo de todas estas variables se establecerá una clasificación de la estructura vertical y horizontal de la vegetación diferenciando cuatro estratos: no combustible, praderas, arbustos y arbolado (Marino *et al*, 2016).

Como resultado se obtiene un análisis de la estructura tridimensional de la vegetación donde se detalla la combustibilidad existente en los distintos estratos así como su continuidad vertical y horizontal.

El tamaño de pixel utilizado (resolución espacial) será el de 10 x 10 m, aunque también se procesarán los datos con un tamaño de pixel de 25 x 25 m. La razón por la que se utilizan estos tamaños de píxel es, en el caso del 25 x 25 por trabajar con el mismo tamaño que las parcelas del Inventario Forestal Nacional. Por otro lado, con el tamaño de pixel 10 se busca obtener resultados que puedan aprovecharse en trabajos futuros pudiendo ser comparados con estudios obtenidos a partir de otros sensores como pueden ser Sentinel-2.

Como se viene diciendo, la vegetación es estudiada en estratos de altura, por lo que lo primero que se debe de dejar claro es el corte que se va a establecer para

diferenciar el matorral del estrato arbolado y este a su vez del arbolado total. Para ello, tras haber consultado las fuentes bibliográficas existentes se llega a la decisión de adoptar la metodología quedando de la siguiente forma:

Tabla 1: Altura de vegetación por estratos (en m.)

ESTRATO DE VEGETACIÓN	ALTURA ESTABLECIDA (EN M.)
HERBÁCEO	0 - 0,50
MATORRAL	0,50 – 2,00
ARBOLADO	2,00 – 50,00
ARBOLADO TOTAL	0,50 – 50,00

Fuente: Marino et al, 2016

El estrato herbáceo no va a ser considerado en este trabajo fin de máster al no de disponer de datos suficientemente precisos y de calidad por parte del PNOA.

Las variables obtenidas con el tratamiento de los datos LIDAR se combinan con información temática que permite establecer una clasificación de coberturas lo más veraz posible en ausencia de trabajo de campo. Para ello se ha realizado la integración de fuentes temáticas del ámbito de LULC (*Land Use Land Cover*), como el SIOSE (2014), el Mapa Forestal de España a escala 1:25.000 (2010), Corine Land Cover (2018) y la cartografía urbana del INDUROT (Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio). Con la combinación de los datos se hará una cartografía de biomasa y combustibilidad forestal de Asturias, basados en el esquema de Rothermel (Seidl, Rupert, *et al.*, 2011).

Los resultados se clasificarán según el grado de combustibilidad. Para establecer dicha clasificación se necesitará del conocimiento de las características básicas de los combustibles y de las derivadas: inflamabilidad y combustibilidad, de las que resultan los modelos de clasificación de combustible.

Se detallarán en los sucesivos apartados cada uno de los pasos y decisiones que se fueron tomando en función de los intereses, particularidades y problemas encontrados a lo largo de la ejecución de la investigación. Para dicho fin, previamente se ha establecido un patrón de búsqueda bibliográfica existente en el campo de estudio (o casos similares) que ayudase a adoptar nuestra propia metodología y en muchos casos corroborar la elegida.

3.2 Fuentes de datos

La tecnología LiDAR

El uso de las técnicas de teledetección se ha extendido en los últimos años a disciplinas muy diversas que pueden llegar a abarcar aspectos geográficos, geológicos, oceanográficos, meteorológicos, de la ingeniería civil, las ciencias forestales, o la agricultura.

Antiguamente, las imágenes satélites y el uso de la ortofotografía aérea eran los recursos existentes para el análisis de los fenómenos que ocurrían en la superficie terrestre, pero la llegada de la tecnología láser con la entrada del nuevo siglo ha cobrado importancia debido a su capacidad de recogida de datos espaciales georreferenciados de forma automática y eficiente (Wehr and Lohr 1999). Esta tecnología conocida como LiDAR nos permite medir la distancia entre un emisor láser y un objeto utilizando un haz de luz monocromático, coherente y direccional.

La historia del primer láser escáner de rubí nos remonta a la década de 1960 con la figura de Theodore Harold Maiman aunque no sería hasta la década siguiente cuando se fueron perfeccionando las técnicas de emisión de pulsos de luz roja y fueron surgiendo aplicaciones prácticas fuera del laboratorio. Aun tendrían que pasar otros 20 años hasta la década de los 90 cuando estas prácticas vieron su aplicación en los espacios forestales con la generación de los primeros modelos de elevaciones (MDE),

la estimación de la altura del dosel arbóreo y del volumen, y la localización e individualización de árboles (Lim *et al.* 2003, Hyypä *et al.* 2004, Hyypä *et al.* 2006).

Estas prácticas han experimentado en los últimos años un gran desarrollo debido a su entrada en el sector comercial y el desarrollo paralelo de software específico para el tratamiento de los datos obtenidos en campo (Renslow 2013).

Una de las revoluciones que ha experimentado esta técnica en el mundo comercial ha sido la mejora del hardware de estos sistemas. Con esta revolución, entre otros muchos avances surge la aparición de los primeros UAV (vehículos aéreos no tripulados), coloquialmente conocidos como drones, que amplió aún más la utilidad de esta tecnología. De esta forma el láser escáner aerotransportado en aviones, helicópteros o drones (ALS – *Airbone Láser Scanning*) es uno de los tipos LiDAR más comunes (Maltamo *et al.* 2014). Los vuelos de estos aparatos requieren de unas normas y limitaciones de altura de vuelo (Baltsavias 1999a, c) y operan en longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR – *Near Infrared*) para poder obtener un escaneo de la superficie, independientemente del momento del día (luz solar), donde la reflectividad de la vegetación y la transmisividad de la atmósfera son altas (Lefsky *et al.* 2002). Una de las limitaciones de esta tecnología es el grado de nubosidad o presencia de partículas en suspensión densas que no permitan el paso del pulso emitido por el láser, ya que la luz infrarroja no penetra a través de estas condiciones (Baltsavias 1999a, Vosselman and Maas 2010).

Una vez terminado el vuelo y escaneada la superficie terrestre deseada se obtiene una nube de puntos con datos de todas las reflexiones (retornos) producidas por los objetos sobre los que el haz de luz láser choca. A la hora de estudiar la información obtenida en el vuelo, para medir la distancia que separa el emisor de pulsos láser del objeto o superficie se pueden distinguir dos tipologías (Wehr and Lohr 1999, Lim *et al.* 2003, Vosselman and Maas 2010, Wulder *et al.* 2012):

- Por un lado, se encuentran los sistemas de onda continua (*full-waveform*, en inglés), que registran toda la energía reflejada

- Por otro, están los sistemas de pulsos directos, que registran uno o varios retornos por cada pulso láser emitido. La distancia recorrida por el fotón de luz desde el transmisor al objeto se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D = v \times \frac{t}{2}$$

Donde v es la velocidad del pulso láser (que se supone igual a la velocidad de la luz en el vacío, $\approx 0,3$ m/ns) y t es el tiempo que tarda el pulso láser en regresar al emisor desde que es emitido y reflejado por el objeto (Baltsavias 1999b).

Serán estos últimos los que tendrán más importancia en el ámbito forestal y topográfico (Shan and Toth 2008).

La característica fundamental que diferencia este sistema del resto de técnicas es la capacidad multi-retorno de un mismo pulso. Además, dependiendo del objeto que encuentre el pulso láser se comporta de manera diferente. Así las características del material con el que choca determinan el tipo de superficie:

- Superficie sólida: el pulso se refleja y retorna al sensor íntegro (1 retorno).
- Superficie de agua: el agua absorbe el pulso emitido y el sensor no obtiene respuesta.
- Vegetación: una característica fisiológica vegetal es que el láser puede atravesar la superficie. Es decir, el pulso emitido no retorna únicamente en el momento en el que encuentre la copa del estrato arbóreo, sino que sigue incidiendo hasta encontrar otro obstáculo (ramas, hojas, etc.) del propio árbol o bien de otro objeto diferente como puede ser el estrato arbustivo o herbáceo y por último el suelo (superficie sólida que no atraviesa). De esta forma en la vegetación el sensor puede recibir información de tantos retornos como el pulso láser encuentre (hasta un máximo dependiendo de las características del sensor).

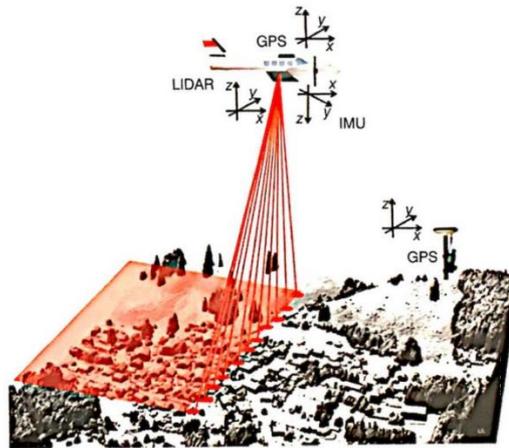


Ilustración 5: Funcionamiento del vuelo LiDAR

Fuente: Vosselman y Maas, 2010

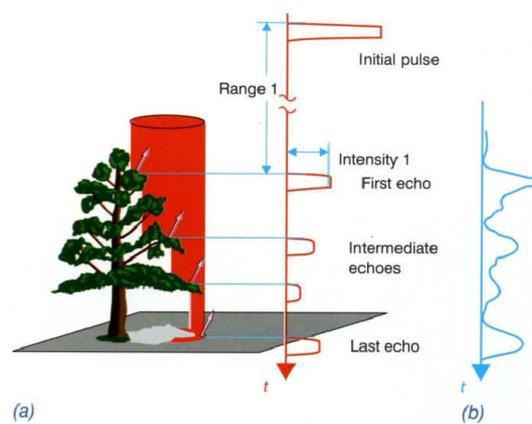


Ilustración 6: Comportamiento del pulso láser en la vegetación

Fuente: Vosselman y Maas, 2010

Es precisamente por la característica comentada respecto a la vegetación por lo que se hace tan interesante la utilidad de estas técnicas para el estudio de las variables forestales. Al poder obtener informaciones a distintos estratos y aplicarles los distintos procesos se puede conocer la altura al suelo de cada retorno y crear un modelo vertical de vegetación y a partir de ahí conseguir estadísticos de las masas.

El LiDAR del PNOA

En el apartado de los datos disponibles, en España esta tecnología (ALS) está disponible de forma gratuita para todo el país a una baja densidad de puntos (0,5 puntos/m²) a través del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) del IGN. A pesar de existir una densidad de puntos mayor (1 punto/m²) este vuelo aún no se ha realizado para el territorio asturiano por lo que estos datos aún no están a nuestra disposición. No obstante para este tipo de trabajos, de forma general, la baja densidad de puntos puede llegar a considerarse suficiente para establecer las métricas requeridas para los mapas de combustibilidad (Gonzalez-Ferreiro *et al.*, 2014; Jakubowski *et al.*, 2013a). En contra a la bibliografía consultada, como se va a ver en algunos casos, esta densidad de puntos es escasa, debido a la frondosidad que presentan algunas especies en nuestro territorio, que hacen que el pulso LiDAR no llegue a atravesar toda la masa y no se muestre información real del suelo, quedando puntos de información aislados que no correspondan con la realidad. Para el Principado de Asturias, los datos fueron publicados en el año 2012, sin que se haya vuelto a volar, mientras que en otras comunidades disponen de una información más actualizada llegando a contar con dos pasadas del láser, haciendo los datos más aprovechables para estudios comparativos de crecimiento de especies, desarrollo de áreas boscosas, o estudios de la incidencia del fuego. Estudios que contarán con una mayor calidad científica, debido a como se comenta, una mayor disponibilidad de datos.

A pesar de ello los datos se publican con dos años de desfase respecto al vuelo, debido a los controles de calidad que los responsables del vuelo aplican a los trabajos, por lo que cuando llegan a estar disponibles para el usuario ya cuentan con un retraso considerable respecto a la realidad. De igual forma ocurre con la densidad de puntos/m².

Las coberturas del territorio se han realizado mediante colaboración y cofinanciación entre el Ministerio de Fomento (por medio del IGN y el CNIG), el

Ministerio de Agricultura, 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 distintas Comunidades Autónomas de España.

Los datos se distribuyen a través del Centro de Descarga del CNIG en ficheros digitales de 2x2 km de extensión. El formato de descarga es LAZ (formato de compresión de ficheros LAS).

Los parámetros técnicos de adquisición de los datos LiDAR son los siguientes:

Tabla 2: Parámetros técnicos de adquisición de los datos LiDAR

	DENSIDAD	PRECISIÓN ALTIMÉTRICA DE LA NUBE DE PUNTOS	PRECISIÓN PLANIMÉTRICA DE LA NUBE DE PUNTOS
PNOA - LIDAR	0,5 p/m ²	RMSEz ≤ (0,2-0,4) m	RMSEz ≤ 0,3 m

Fuente: PNOA, 2012

Las nubes de puntos tridimensionales han sido capturadas mediante sensores LiDAR. Una vez realizados los controles de calidad, se clasifican de manera automática basándose en los valores Infrarrojo y finalmente son coloreadas en RGB a partir de las ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con tamaño de píxel de entre 25 y 50 cm o a partir de ortofotos obtenidas simultáneamente en el propio vuelo LiDAR.

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. Las coordenadas Z son altitudes ortométricas.

MÁXIMA DENSIDAD PUBLICADA

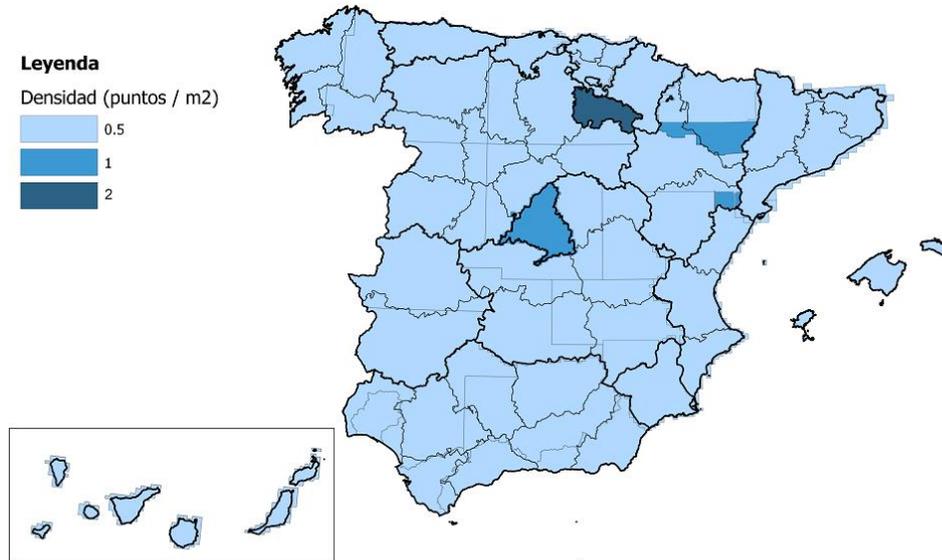


Ilustración 7: Densidad de pulsos/m² LiDAR publicados en el PNOA por comunidades

Fuente: PNOA

MÁXIMA ACTUALIDAD PUBLICADA

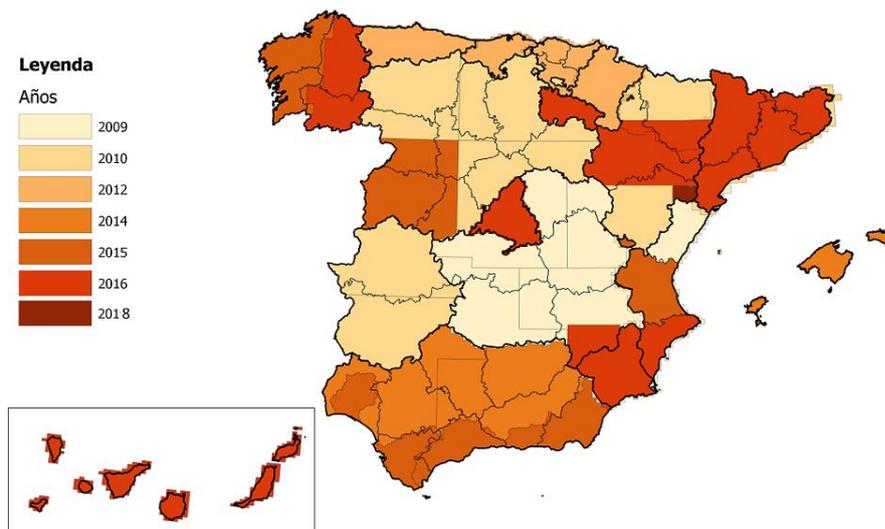


Ilustración 8: Máxima actualidad LiDAR publicada en el PNOA por comunidades.

Fuente: PNOA

COBERTURAS PUBLICADAS

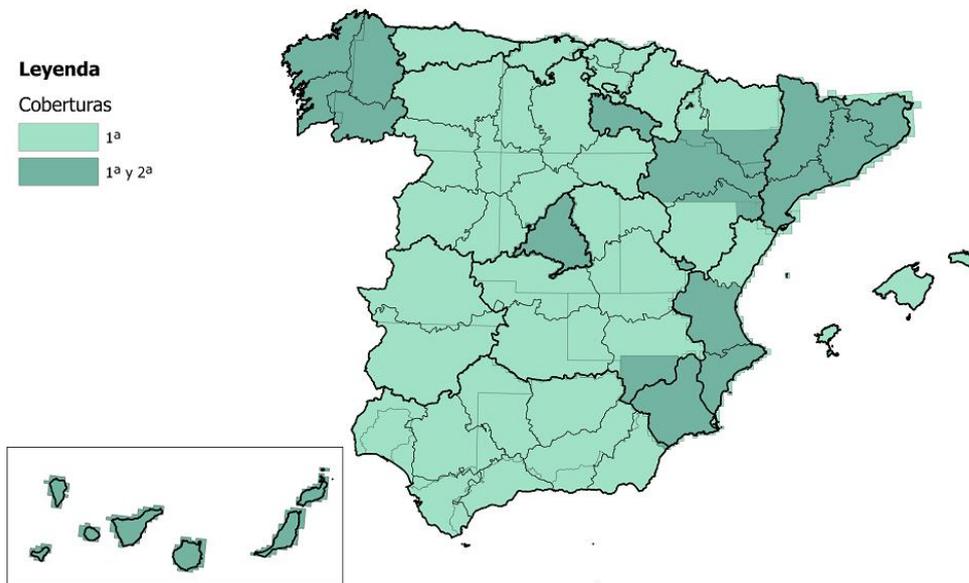


Ilustración 9: Coberturas LiDAR publicadas en el PNOA por comunidades

Fuente: PNOA

La descarga de los datos se realiza a través del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional³.

Otras fuentes de datos

En este apartado se exponen los materiales utilizados para la realización del proyecto.

- Modelo digital de elevaciones de 5 metros de Asturias en formato *.asc en el Sistema de Coordenadas ETRS 1989 UTM Zona 29N y 30N. Este modelo fue descargado directamente del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

³ <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do?codFamilia=LIDAR>

- División administrativa a nivel autonómico en formato *.shp, en el Sistema de Coordenadas ETRS 1989 UTM 30 N. Información obtenida a través del servicio de descarga del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA).
- Máscara de las zonas combustibles y no combustibles del Principado de Asturias (Trabajo fin de máster de *Eva Quintanilla Garriel* que lleva por título “Análisis y Evaluación de Interfaz Urbano Forestal en caso de incendio en el Principado de Asturias”)
- “Random Forest”, algoritmo predictivo que usa la técnica de “bagging” para combinar diferentes árboles, donde cada árbol es construido con observaciones y variables aleatorias.
- MFE25, cartografía base del Cuarto Inventario Forestal Nacional con la que se obtienen las parcelas obtenidas por las brigadas forestales y así verificar los resultados del método con verdad-terreno. El tamaño de las parcelas es de 25x25 m.

Tabla 3: Historia de los IFN

<i>Inventario</i>	<i>Ciclo</i>	<i>Estratificación</i>	<i>Nº de parcelas</i>
<i>IFN 1</i>	1965 - 1974	Malla variable en cada provincia, sobre fotografías aéreas	65 000
<i>IFN 2</i>	1986 - 1995	Malla sobre el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos, Escala 1:50.000	84 203
<i>IFN 3</i>	1997 - 2007	Malla sobre el Mapa Forestal de España, escala 1:50.000 (MFE 50)	95 327
<i>IFN 4</i>	2008 - 2018	Malla sobre el Mapa Forestal de España, escala 1:25.000 (MFE 25)	98 000 aprox

Fuente: Alberdi et al, 2017

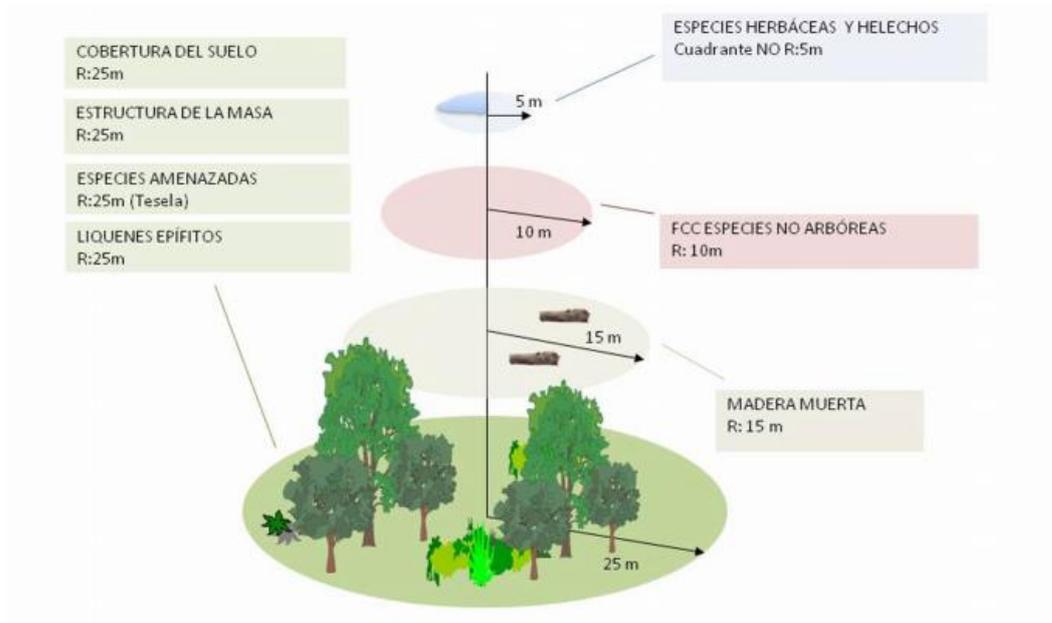


Ilustración 10: Diseño del muestreo de las variables medidas en campo (parcelas) en el IFN

Fuente: Alberdi et al, 2017

3.3. Software utilizado

En este apartado se detallan las distintas herramientas, tanto libres como comerciales, que se utilizan para llevar a cabo la realización del proyecto de la forma más eficiente posible en cada caso.

- *ArcGis* de *ESRI* en la versión *10.2*. El motivo de usar este software comercial y no otro libre es la disponibilidad de licencia del programa, y por su fácil manejo con un interfaz y unos comandos intuitivos.
- *Microsoft Office Word 2010* de Microsoft.
- *Microsoft Office Excel 2003* de Microsoft.
- *PyCharm*: software de código abierto de desarrollo integrado utilizado en la programación de computadoras, específicamente para el lenguaje Python.
- *Fusion V. 3.80*: software de código abierto para la visualización, análisis y tratamiento de datos LiDAR.

Como ya se comenta en el apartado introductorio, la línea de la investigación tendrá como base el aprovechamiento de los datos LiDAR (gratuitos) ofrecidos por el PNOA a través del IGN para la mejora de la metodología existente en el ámbito de la cartografía para la prevención de incendios forestales. Para ello, se desarrolla un flujo de trabajo que nos permite conocer las estadísticas de la vegetación. Con este fin, y tras una extensa revisión bibliográfica se decide utilizar como software *Fusion*, el cual, a través de un flujo de procesos, nos permite conocer tales estadísticas con las que obtener unos resultados en forma de mapa.

Fusion V. 3.80 tiene su origen en el trabajo desarrollado por Robert J. McGaughey, un empleado del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (departamento encargado de la gestión de los recursos forestales del país), para ayudar a los investigadores a comprender, explorar y analizar los datos LiDAR. Hasta este momento los grandes conjuntos de estas nubes de puntos no podían utilizarse en entornos de procesamientos de imágenes o SIG comerciales sin un pre-procesamiento extenso. Tras un periodo de pruebas por parte de los investigadores junto con la universidad de Washington decidieron diseñar un sistema más completo para apoyar sus esfuerzos de investigación.

De esta forma *Fusion* se ha ido desarrollando paulatinamente desde su creación y trabaja en forma de comandos concatenados donde se deben de especificar las distintas rutas de archivos, *switches* y directorios donde guardar los nuevos archivos creados tras la ejecución del proceso. Los *switches* se definen como el conjunto de características que se le quieran dar al comando concatenado creado, en función de los resultados esperados y los objetos analizados. Los comandos que se han ido desarrollando y que se explicarán a continuación han sido creados en base al manual del programa donde se detallan específicamente las normas de cada comando y las funcionalidades que aporta al proceso. La utilidad de la línea de comandos es que proporciona capacidad de procesamiento incluyendo filtrado de puntos, conversión de datos, y la evaluación de la calidad para grandes lotes de datos LIDAR. Estas líneas se suelen ejecutar desde el símbolo del sistema o mediante uso de programas por

lotes (archivos de extensión *.bat*). Los archivos guardados con esta extensión nos permiten ejecutar cada herramienta sin necesidad de llevar el comando al intérprete (cmd.exe) de Windows, bastando con hacer doble *click* sobre el archivo deseado para que este automáticamente inicie el proceso.

No obstante, para evitar la incomodidad de crear un archivo ejecutable por cada proceso a realizar, evitando así de esta forma los posibles errores que un gran tratamiento de volumen de datos puede acarrear, y aprovechando otra vez los conocimientos adquiridos en el máster, se desarrolla en este trabajo un programa que automatiza la cadena de procesos. Con esto se consigue cumplir con uno de los objetivos y requisitos de esta investigación y además facilitar el trabajo, haciendo que la máquina produzca, pudiendo desarrollar el responsable o los responsables del método otras tareas al mismo tiempo que el procesado se va ejecutando.

Antes de comenzar, es conveniente y recomendable crear un directorio, donde guardar los datos de trabajo, en el disco duro C:\ de la máquina con la que se trabaje, para agilizar la ejecución del software; pero, en nuestro caso, debido al peso de los datos que se manejan hace que estos tengan que ser procesados y almacenados a través de un servidor externo.

3.4 Procesado de datos LiDAR

Pre-procesado de datos LiDAR

Una vez obtenida la totalidad de la nube de puntos en formato **.laz*, mediante el software LASTask Tools se lleva a cabo la descompresión de los archivos a formato **.las* para poder trabajar con ellos. En un primer momento, debido al peso de memoria que la descompresión de los archivos iba a acarrear, se pensó, tras realizar consultas en los manuales y documentos de los softwares utilizados, en trabajar directamente con los archivos comprimidos, ahorrando tanto memoria en el servidor como tiempo

en los procesos a ejecutar. Para ello hay que asegurarse de tener copiado en la carpeta del software el archivo *LASzip.dll*.

Finalmente, esta opción ha sido descartada al comprobar varios errores en pequeñas pruebas realizadas y la no recomendación tanto de los manuales oficiales como de los tutores de este trabajo fin de máster.

Una vez descomprimidos los archivos, una de las problemáticas surgidas desde el primer momento fue la localización de la zona de trabajo, al encontrarse Asturias dividida por los Husos 29 y 30 que conllevan distintas georreferenciaciones.

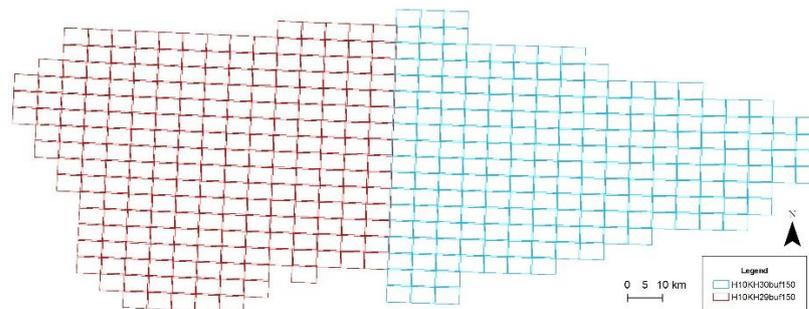


Ilustración 11: Cuadrícula 1:10.000 del IGN dividida por husos

Fuente: Elaboración propia

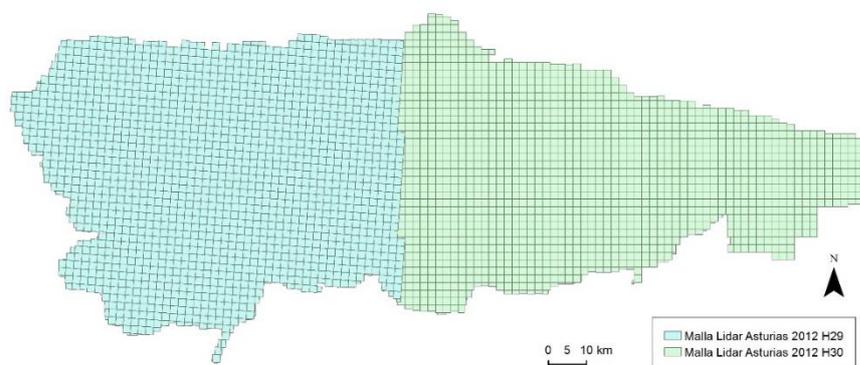


Ilustración 12: Malla LiDAR (2012) Asturias dividida por husos

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, otro de los problemas que se plantearon fue la elección de la escala adecuada con la que trabajar. El objetivo marcado en los esquemas era el de producir con cuadrículas del IGN a escala 1:50.000, con la finalidad de disminuir el número de lotes a procesar. Tras unas pequeñas pruebas de procesado inicial se vio que los medios técnicos disponibles no tenían la capacidad de ejecutar a tal escala, por lo que se decide bajar un peldaño e intentarlo a escala 1:25.000. Se sigue el mismo proceso y el error sigue existiendo. Tras localizar que el fallo provenía de la falta de espacio de almacenamiento en el servidor del instituto de investigación, se procede a hacer otra descarga de las mismas cuadrículas a escala 1:10.000 para cada huso (29 y 30). Comprobando que las pruebas realizadas esta vez no presentan ningún problema y los resultados son acordes a lo que se espera, se decide trabajar a partir de este momento a escala 1:10.000 para el conjunto del Principado.

Resuelta la elección de la escala, debía de resolverse el problema de la división del territorio en diferentes husos. Se sigue la estrategia fácilmente desarrollada de dividir las cuadrículas del IGN por la línea divisoria de ambos husos. Se carga la malla LiDAR de Asturias en *ArcGis* y la hoja con las cuadrículas 1:10.000 divididas por husos.

A la capa de las cuadrículas 1:10.000 se le debe de aplicar un “*buffer*” de 150 m para que ningún espacio entre hojas quede sin analizar, de modo que se solapen. Con la herramienta “*intersect*” se cruza la capa de las cuadrículas con los datos de la malla *LiDAR*. En la tabla de atributos se crea un campo con la ruta completa de cada archivo para posteriormente exportarla a un formato de tablas de texto que pueda ser editable fácilmente. De esta forma se consigue un archivo *.csv donde aparecen los archivos *.las divididos por cuadrículas y husos (ETRS89 29 o 30). Se clasifica la información en tantas pestañas como hojas existan, donde se detalla la ruta específica de cada archivo *.las de la malla *LiDAR*. Lo que realmente es interesante de esta división es obtener un archivo *.txt por cada pestaña. Así se tienen los archivos divididos por cuadrículas en un formato manejable y con el que poder trabajar posteriormente con los comandos de *Fusion LiDAR Forestry*. Para ello, se convierte el archivo generado (*.csv) en archivo de hoja de cálculo (*Excel*) y con la herramienta

Macros automáticamente cada hoja fue exportada y los archivos **.txt* con las listas y las rutas creadas fueron almacenados individualmente en el directorio seleccionado.

El código que detalla el proceso de obtención de las listas podrá consultarse en el anexo 1.

Una vez obtenidas las listas, se continúa el pre-procesado con alguno de los comandos de *Fusion*[®]. El uso de estos se realiza en materia de ahorro de espacio en el servidor, disminuyendo el número de puntos por **.las* y por hoja, que facilita la labor del procesado. A continuación, se detallan sus características:

– *PolyClipData*

Este comando recorta los datos de puntos usando polígonos almacenados en el formato **.shp* de *ESRI*. El objetivo es producir un único archivo de salida que contenga todos los puntos que están dentro de cada uno de los polígonos (cuadrículas 1:10000) del **.shp*. De esta forma obtendremos un total de 435 archivos en formato **.las* de los 4.324 elementos descargados para el conjunto del Principado de Asturias que se tenían al principio.

– *FilterData*

FilterData aplica varios filtros para devolver archivos de datos para producir nuevos archivos de datos de retorno con solo los rendimientos que cumplen con los requisitos del filtro. La función es eliminar "valores atípicos" (outlayers) de los archivos de datos de retorno. Otras opciones de filtro superponen los datos de retorno con una cuadrícula especificada por el usuario y producen archivos de retorno de salida que contienen solo los rendimientos con la elevación mínima o máxima para cada celda de cuadrícula.

Ambos comandos se ejecutan en forma de *.bat*, debido a la simplicidad de su sintaxis. La diferente sintaxis de cada comando puede consultarse en el anexo 1.

Tras llevar a cabo el pre-procesado de los datos, se da comienzo al cálculo de estadísticas y variables.

Flujo de procesos en la generación de métricas LiDAR

A partir de los 435 elementos obtenidos en el pre-procesado, se desarrolla un *script* en *python* que automatiza el proceso para cada uno de los archivos. La automatización del proceso a través de la programación nos permite desarrollar casi 200 líneas de código con un solo *click* evitando así errores de transcripción de comandos y siendo fácilmente editable cualquiera de los parámetros que se le detallen al comando para la totalidad de los archivos y variables.

A continuación se representa el flujo de procesos a seguir:

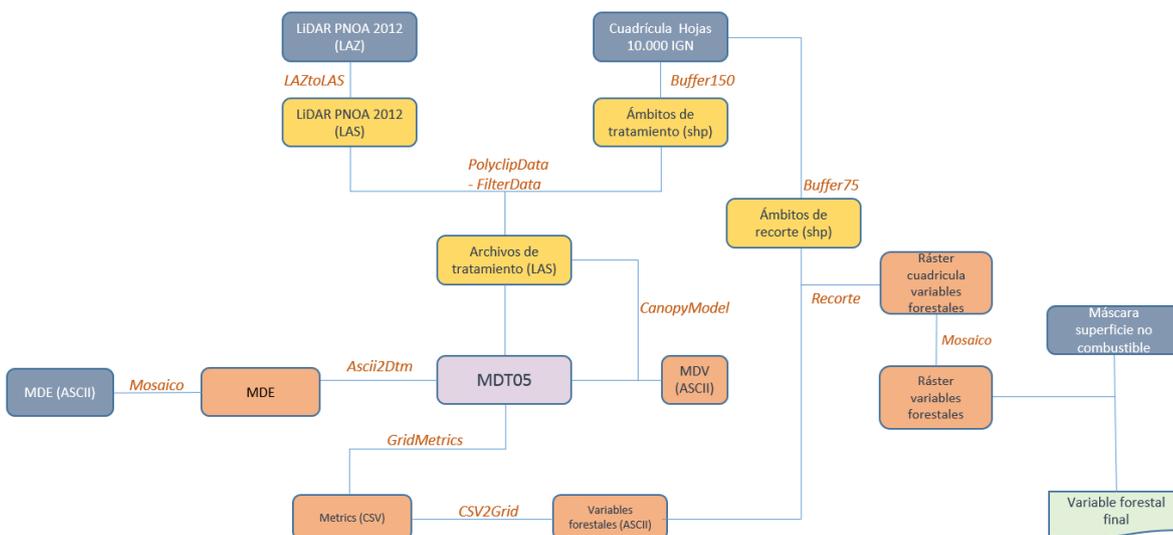


Ilustración 13: Flujo de procesos

Fuente: Elaboración propia

Se detalla que la definición de los comandos ha sido extraída íntegramente del documento oficial que el propio software descarga a la hora de realizar la instalación

del programa (McGaughey, 2009). El desarrollo del programa en Python puede consultarse en el anexo 1.

– *Groundfilter*

Con este comando se filtra la nube de puntos y se identifican los retornos que se supone que pertenecen a la superficie del terreno. Aunque la precisión de este comando es elevada se pueden encontrar puntos aleatorios que se alejen de la realidad. Estos puntos mal filtrados pueden deberse a zonas extensas con elevaciones similares (como por ejemplo edificios). Muchos de los retornos de la vegetación pueden ser eliminados con una buena elección de los coeficientes en la función de pesos y número de iteraciones. Es por esta razón por la que la elección de los parámetros g y w y el número de iteraciones determina el grado de filtrado y por consiguiente exactitud de verdad para la superficie terreno.

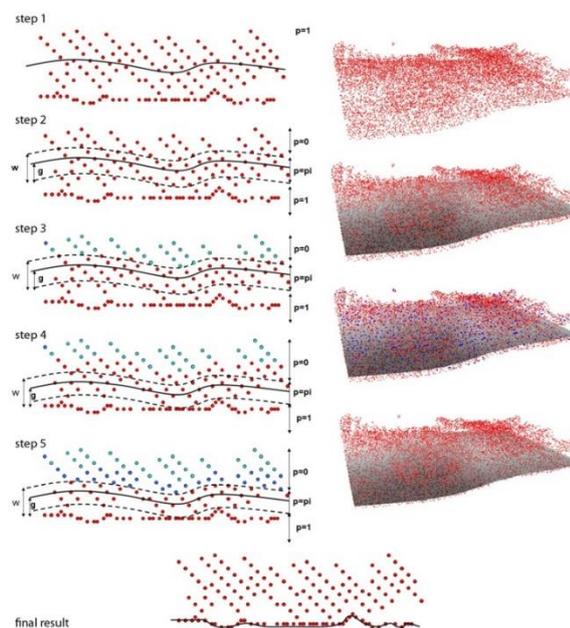


Ilustración 14: Funcionamiento de los parámetros g param, w param e iterations del comando GroundFilter de Fusion LiDAR Forestry

Fuente: Kraus y Pfeifer 1998

En el comando implementado, los valores (switches) *gparam* y *wparam* no varían una vez se ha lanzado el comando, aunque hay referencias que citan que el parámetro *g* varia para cada iteración (Kraus y Pfeifer 1998).

Tras la iteración final, los puntos terreno verdaderos que satisfagan las dos primeras condiciones de la función de pesos son considerados puntos terreno.

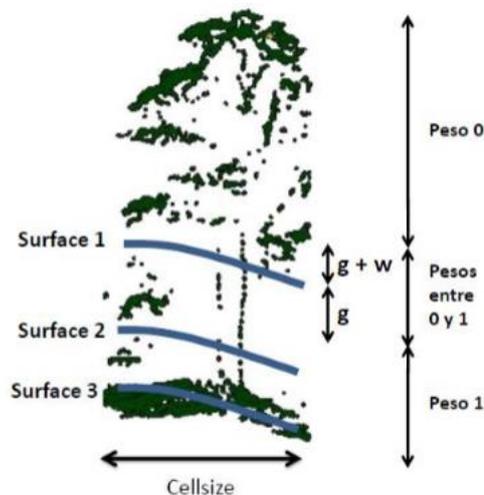


Ilustración 15: Asignación de pesos a cada retorno en función de valores de "g" y "w"

Fuente: Rodríguez y Fernández, 2013

Como se detalla, la elección de los parámetros *g* y *w* y el número de iteraciones determina el grado de filtrado y por consiguiente exactitud de verdad para la superficie terreno. Debido a que el resto de los comandos trabajan sobre el *.dtm generado a partir de *GroundFilter*, la correcta elección de los valores *g*, *w* y sus respectivas iteraciones resultan fundamentales. En un primer momento, tras una extensa revisión bibliográfica de otros trabajos académicos (Álvarez Álvarez, & Canga Líbano, 2016) que utilizaban esta misma metodología se decide utilizar los parámetros del "Método 1" de la tabla, los cuales hacen un filtrado prácticamente perfecto de la vegetación y crean un modelo que se ajusta mucho a la realidad.

Tabla 4: Parámetros g, w y sus iteraciones para el comando GroundFilter

Método	GPARAM	WPARAM	ITERATIONS
1	-1.42	1.5	5
2	0	0.5	8

Fuente: Elaboración propia

Una vez analizados los resultados se decide probar a generar el modelo digital del terreno con los parámetros del “Método 2” (valores por defecto dados por el software) para comprobar la variación de los *.dtm generados con uno y otro método en función de la g, w y sus iteraciones.

Al existir discrepancia de zonas y valores para cada “prueba” y comprobando el error, se asume y se deja constancia de los ensayos realizados con distintos parámetros, esclareciendo la importancia que tienen los parámetros de **g** y **w** con sus respectivas **iteraciones** para el método.

De esta forma al ser un procedimiento iterativo y sin bibliografía oficial detallada se limita el trabajo debiendo ser este acompañado en la utópica investigación, de trabajo de campo que aporte una verdad absoluta al método.

Antes de aventurarse a la elección de otros parámetros aleatorios, predeterminados, o que no garantizaran la absoluta verdad al procedimiento, se decide tras una puesta en común, el utilizar los modelos digitales del terreno creados a partir de los datos del PNOA generados por el IGN. Para ello se descargó el Modelo Digital del Terreno - MDT05 en formato *.asc de todo el Principado y se juntaron todos los archivos formando un mosaico para cada huso con “Mosaic to New Raster”. Una vez obtenido el mosaico, el cual se genera en formato *.tif, debe de ser reformateado a *.dtm (formato que requiere Fusion para que el comando funcione). Para llevar a cabo esta transformación sin que los valores de pixel se viesan alterados, se convierte primero a formato *.asc con la herramienta “Raster to Ascii” para luego con la herramienta de Fusion “Ascii2Dtm” convertirlo a *.dtm.

Los parámetros técnicos de adquisición de los datos para la obtención del Modelo Digital del Terreno son los siguientes:

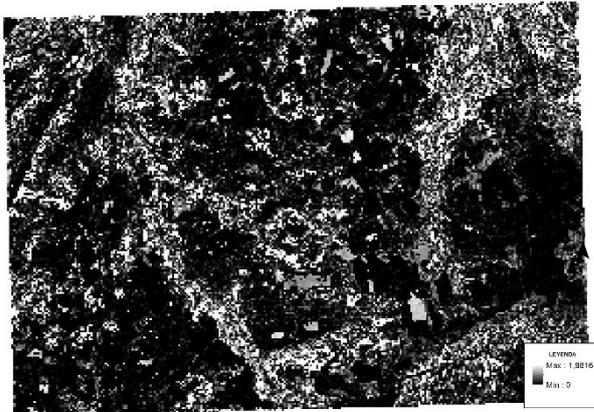
Tabla 5: Parámetros técnicos de adquisición de los datos de obtención del MDT

	<i>DENSIDAD</i>	<i>PRECISIÓN ALTIMÉTRICA DE LA NUBE DE PUNTOS</i>	<i>PRECISIÓN PLANIMÉTRICA DE LA NUBE DE PUNTOS</i>
PNOA - LIDAR	0,5 p/m ²	RMSEz ≤ (0,25-0,50) m	RMSEz ≤ 0,5 m

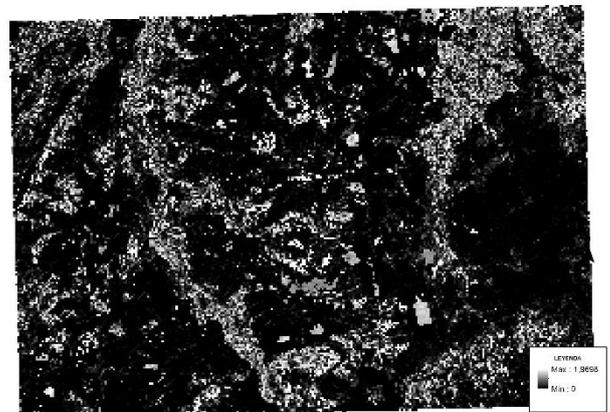
Fuente: PNOA

Esta explicación se complementa con las pruebas realizadas siguiendo los tres métodos (**g** y **w** iniciales, **g** y **w** secundarios y el **MDT** generado a partir de los datos del IGN).

Método 1



Método 2



Archivos del PNOA

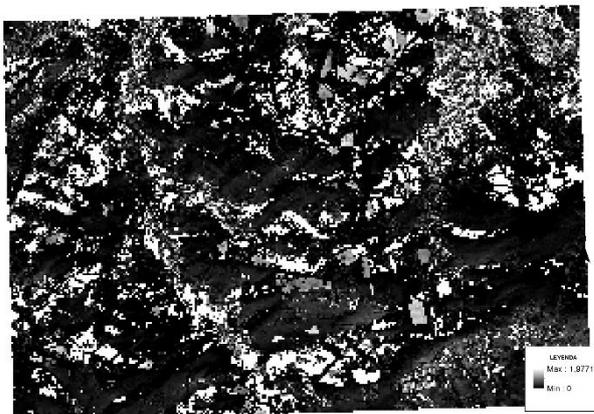


Ilustración 16: Tabla comparativa de los archivos generados a partir de los diferentes parámetros g , w e $iterations$

Fuente: Elaboración propia

– *GridSurfaceCreate*

Tras el filtrado anterior, se genera con este comando un MDT (Modelo Digital del Terreno). Se podrán generar MDT a la resolución deseada, con el objetivo de comparar resultados. En este caso se ha generado el modelo a 5 metros obteniendo un archivo con extensión .dtm. La elección de este tamaño de celda se basa en la densidad de puntos de los datos de partida ($0,5m^2$). El archivo de partida para la elaboración del MDT fue el precedente de *Groundfilter*.

Al haber optado por generar el Modelo Digital del Terreno a partir de los datos ofrecidos por el Instituto Geográfico Nacional, los comandos “*GroundFilter*” Y “*GridSurfaceCreate*” desaparecen del flujo de procesos del método debido a la

inexactitud de los mismos para una escala tan general y siendo escasa la bibliografía que presentan la elección de estos parámetros.

– *CanopyModel*

Utilizando la nube de puntos completa filtrada y la aplicación de este comando, se genera un modelo de superficie de dosel, es decir, un modelo de superficie de copas. De forma predeterminada el comando asigna la elevación del valor más alto dentro de cada celda de la cuadrícula al centro de la celda de la cuadrícula.

– *GridMetrics*

Tras la generación del MDE, se obtuvieron las alturas respecto al suelo de todos los retornos (normalización). Este comando genera un archivo con extensión *.csv donde se muestran una serie de estadísticas descriptivas para el conjunto de datos de las variables para cada píxel.

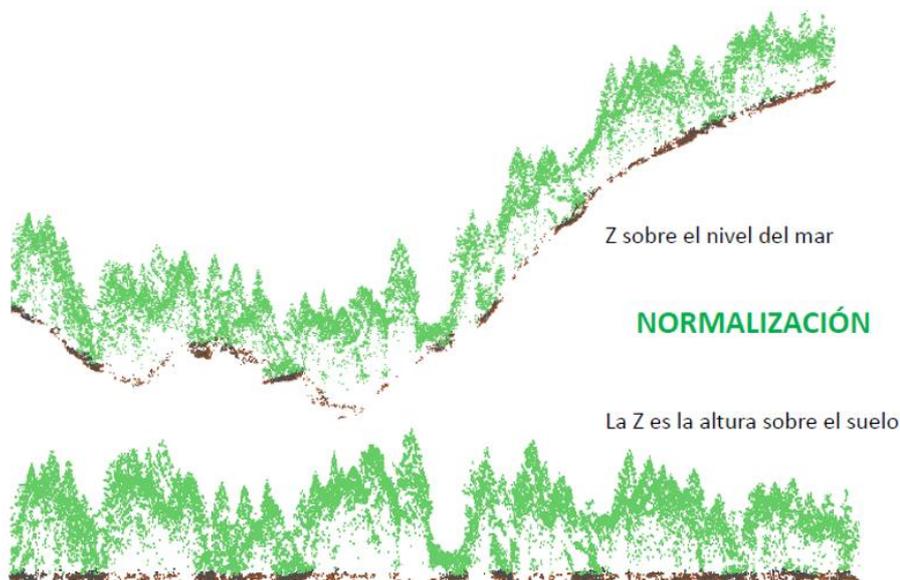


Ilustración 17: Normalización de la nube de puntos LiDAR

Fuente: Rodríguez y Fernández, 2013

La salida es un ráster (cuadrícula) representado en forma de base de datos con cada registro correspondiente a una sola celda de cuadrícula. *GridMetrics* es similar al comando *CloudMetrics*, excepto que calcula las métricas de todas las devoluciones dentro de cada celda en la cuadrícula de salida. La salida predeterminada de *GridMetrics* es un archivo de texto ASCII con valores separados por comas (formato CSV). También genera capas ráster almacenadas en formato PLANS DTM.

Con este comando se generan 3 archivos independientes: “*elevation*”, “*strata*” e “*intensity*”, los cuales tienen información de la elevación de los puntos, de los estratos de la vegetación y de la intensidad de los pulsos, respectivamente. En el caso de este trabajo tan solo se aprovechará la información de los dos primeros.

– *Cover*

Este comando junto con el Modelo Digital del Terreno y los archivos **.las* generan un “*dtm*” con el modelo de cobertura de vegetación. Al agregar un límite de altura superior (ver *Tabla 1*), *Cover* puede calcular la proporción de retornos que caen dentro de rangos de altura específicos que proporcionan estimaciones de la densidad de vegetación relativa para varios estratos de altura.

– *DTM2ASCII*

DTM2ASC convierte los datos almacenados en el formato PLANS DTM en archivos ráster ASCII. Dichos archivos se pueden importar en software GIS. Es por esto por lo que se ejecuta este comando, para poder trabajar fácilmente con los archivos en un entorno GIS.

– *DTM2TIF*

Este comando funciona igual que el anteriormente descrito. La diferencia es que en este caso el archivo de salida tiene extensión **.tif* con una resolución de 8bytes, es decir un máximo de 256 valores.

En un primer momento se pensó en convertir los modelos de elevación del terreno a este último formato explicado, en materia de ahorro de espacio en el servidor, pero consultando el manual del software se llegó a la conclusión de que esto no sería viable debido a que con la conversión, la resolución espectral obtenida (8 bytes), no sería válida para este estudio. En consecuencia, se elimina este parámetro del proceso y se realiza la transformación con el comando DTM2ASCII.

– *CSV2GRID*

CSV2GRID transforma archivos *.csv en ASCII, utilizando números de columna en forma de “switches” para especificar los estadísticos de interés. En este caso se hacen los siguientes estadísticos de cálculo: **altura de la vegetación** (CM), **altura mínima** (HMin), **altura máxima** (HMax), **altura media** (HM), **Fracción de Cobertura Cubierta** (FCC), **desviación estándar** (Std), **altura del percentil 90** (H90), **altura del percentil 95** (H95) y **continuidad vertical del arbolado total** (CRR – *Canopy Relief Ratio*, en inglés). Todas ellas tanto para el estrato de matorral como el arbolado para 25 y 10 metros de resolución espacial respectivamente. Para el caso del arbolado total, los estadísticos calculados son la altura media, máxima y mínima de la vegetación y la continuidad vertical.

En función de lo que se quiera calcular debemos de introducir en forma de condición (“switch”) el número correspondiente a cada estadístico. En nuestro caso, estos números de columnas se comprueban en los CSV creados con el comando, siendo “strata” y “elevation” los utilizados dependiendo de lo que se quiera calcular.

Para el caso del matorral hay que indicarle al comando la ruta del archivo *.csv generado (“GridMetrics”) que contenga los datos referidos a **todos los retornos** para la elevación (“elevation”) en las métricas Std, H90 y H95, mientras que, para la HM, HMax y HMin, se indican también todos los retornos pero del *.csv que contiene información por estratos (“strata”).

Para el caso del arbolado se le debe de indicar al comando la ruta del archivo *.csv generado (“GridMetrics”) que contenga los datos referidos a los **primeros retornos** para la elevación (“elevation”) en las métricas Std, H90 y H95, mientras que para la HM, HMax y HMin, indicarle también los primeros retornos pero del *.csv que contiene información por estratos (“strata”).

Por último, para la obtención de la Continuidad Vertical del arbolado total se le debe de indicar al comando la ruta del archivo *.csv generado (“GridMetrics”) que contenga los datos referidos a **todos los retornos** para la elevación (“elevation”).

GMAT10_H29H_36-20_all_returns_elevation_stats.csv	01/07/2019 20:46	Archivo de valores...	175.440 KB
GMAT10_H29H_36-20_all_returns_elevation_stats_ascii_header.txt	01/07/2019 20:46	Documento de tex...	1 KB
GMAT10_H29H_36-20_all_returns_intensity_stats.csv	01/07/2019 20:44	Archivo de valores...	117.310 KB
GMAT10_H29H_36-20_all_returns_intensity_stats_ascii_header.txt	01/07/2019 20:44	Documento de tex...	1 KB
GMAT10_H29H_36-20_all_returns_strata_stats.csv	01/07/2019 20:44	Archivo de valores...	93.978 KB
GMAT10_H29H_36-20_all_returns_strata_stats_ascii_header.txt	01/07/2019 20:44	Documento de tex...	1 KB

*Ilustración 9: Archivos *.csv generados a partir de GridMetrics*

Para el arbolado total, para el cálculo de la HM, HMax y HMin se indican todos los retornos del *.csv que contiene información por estratos (“strata”).

Junto con estos aparece también el documento que refleja la intensidad del pulso, que, en este caso, no nos interesa. La relación numérica para el cálculo de las variables se detalla en la tabla 6, donde se puede ver el número de columna y la métrica de elevación correspondiente para cada estadístico:

Tabla 6: Métricas de elevación

COLUMNA	MÉTRICA DE ELEVACIÓN
16	Elevación mínima
17	Elevación máxima
18	Elevación media
36	Percentil 90
37	Percentil 95
68	CRR

Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizado el proceso y habiendo comprobado que todas las variables a nivel cuadrícula creadas tienen valores razonables y se ajustan a los resultados esperados, se llega al momento de tener que crear un mosaico que contenga los 435 archivos de cada variable. Hay que recordar en este punto que cada hoja dispone de 150 m de solape con las que la rodean, por lo que hay que corregir el efecto borde para que los solapes no se perciban.

Se utiliza para ello una nueva herramienta que nos permita automatizar el proceso y evitar de esta forma recortar cada cuadrícula de cada variable repetidamente. La herramienta de ArcGis *Model Builder* nos permite encadenar el corte de los archivos generados (variables) por cada hoja de la cuadrícula 1:10000, con un *buffer* de 75 m, eliminado así el efecto borde.

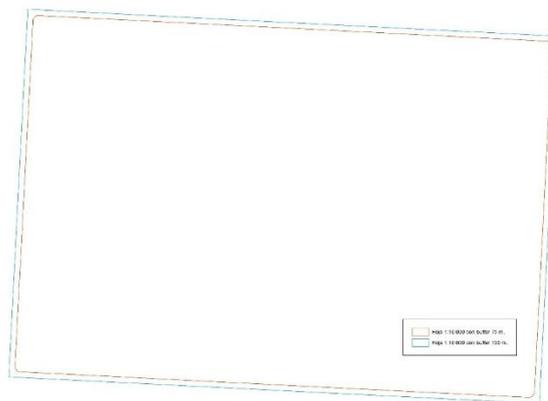


Ilustración 18: Comparación hoja 1:10 000 con buffer de 75 m. y 150 m.

Fuente: Elaboración propia

Estos datos se almacenan en una *Geodatabase* donde se creará la herramienta llamada “*Corte*”.

En “*Corte*” se creará el modelo a partir de un iterador ráster (*iterator raster*) que recorra todos los directorios seleccionados (donde se encuentren los datos), seleccione aquellos según la condición establecida (donde se detalla la columna CCFF de la tabla de atributos- al ser esta donde está el nombre de los archivos- y el número

de caracteres a leer) y recorte cada archivo (variable) por cada hoja de la cuadrícula 1:10000 con un *buffer* de 75 m. La herramienta *Extract by Mask* permite ejecutar este proceso, detallándole la proyección de los archivos (ETRS89 29 o 30) y el directorio de salida en formato *.tif. Para una mejor organización de los datos recortados, se le añade al directorio de salida la expresión %name%.tif para que cada cuadrícula de datos tenga el nombre de la selección CCFF previamente creada.

De esta forma mediante esta técnica se reduce el tiempo de procesado y permite encadenar los procesos de forma que se realicen automáticamente. Previamente a los datos se le han tenido que definir las proyecciones para que la herramienta de “Corte” se ejecute correctamente.

El sistema Geodésico de Referencia que se usa es el *European Terrestrial System 1989* (ETRS89). La proyección cartográfica utilizada es la *Universal Transversal Mercator* (UTM) en la zona Norte y el huso 29 y 30, dependiendo de la zona de Asturias en la que nos encontremos.

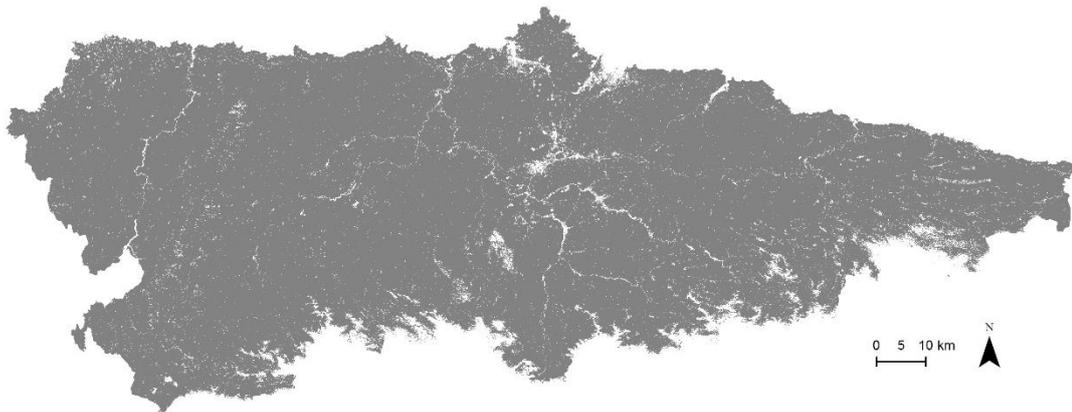


Ilustración 19: Zonas combustibles y no combustibles del Principado de Asturias

Fuente: Elaboración propia a partir de Quintanilla Garriel, E. (2019)

Para crear el mosaico final de cada una de las variables se utiliza de nuevo la herramienta de *ArcGis* “Mosaic to New Raster”. Una vez unida la máscara debe de ser

recortada por el límite de Asturias y se le debe de extraer la superficie no combustible. Para ello se cruza con la máscara de zonas combustibles y no combustibles (**Ilustración 19**) reclasificada a valores de 0 (blanco- no combustible) y 1 (gris- combustible).

Los modelos creados con la herramienta *Model Builder* pueden consultarse en el anexo 1.

3.5 Clasificación de los modelos de combustible

A la hora de predecir y calcular el riesgo por incendio y el comportamiento del fuego, el conocimiento de los modelos de combustible que están presentes en un territorio es tarea fundamental. Por ello, después de calcular las distintas variables que nos indican las estadísticas de la vegetación, se procederá a diferenciar los modelos que estén presentes. Se sigue en esta metodología la bibliografía de los modelos de combustible *Rothermel* (1972) & *Albini* (1976) basada en la estructura de los 13 modelos clásicos NFFL (Northern Forest Fire Laboratory, USDA Forest Service, USA) que aparecen en el sistema BEHAVE.

De estos 13 modelos, 11 fueron desarrollados por Anderson y Brown, y publicados por *Rothermel* (1972).

A continuación se procede a detallar una explicación de cada modelo según la revista *Wild Fire Analyst*⁴:

– *Modelo 1*

Pasto fino seco y bajo, que recubre completamente el suelo. El matorral o el arbolado cubren menos de 1/3 de la superficie. El fuego se propaga rápidamente.

⁴ [http://wildfireanalyst.com/help/spanish/modelos_de_combustible_rothermel_\(1972\)_albini_\(1976\).htm](http://wildfireanalyst.com/help/spanish/modelos_de_combustible_rothermel_(1972)_albini_(1976).htm)

– *Modelo 2*

Pastizal con presencia de matorral o arbolado claro que cubre entre 1/3 y 2/3 de la superficie. El combustible está formado por el pasto seco, la hojarasca y ramillas caídas de la vegetación leñosa. El fuego corre rápidamente por el pasto seco.

– *Modelo 3*

No representado en nuestra zona de estudio. Pastizal espeso y alto (> 1m). Es el modelo típico de las sabanas. Lo más parecido que se pueda representar en Asturias son los campos de cereales. Los incendios, en este caso son rápidos y de alta intensidad.

– *Modelo 4*

Matorral o arbolado joven muy denso de unos 2 metros de altura. Existe una continuidad horizontal y vertical de la vegetación. La abundancia de combustible leñoso muerto sobre las plantas vivas hace que el fuego se propague rápidamente sobre las copas del matorral con gran intensidad y llamas grandes. La humedad del combustible vivo influye en el comportamiento del fuego.

- *Modelo 5:* Matorral denso y joven (< 1m de altura) con poca presencia de material muerto.
- *Modelo 6:* Matorral muy similar al del modelo 5 pero con alturas superiores a 1 metro o con restos de frondosas.
- *Modelo 7:* Agrupado al modelo 6 en esta metodología, se trata de matorrales de especies muy inflamables con alturas de menos de 2 metros o pinares de sotobosque.
- *Modelo 8:* Hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas la hojarasca forma una capa compacta al estar formada por acículas cortas (< 5 cm) o por hojas planas no muy grandes.

- *Modelo 9:* Agrupada al modelo 8 en esta metodología, se trata de hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas, que se diferencia del modelo 8 en que forma una capa esponjada poco compacta, con mucho aire interpuesto. Está formada por acículas largas, como en masas de *Pinus Pinaster*, o por hojas grandes y rizadas como las de *Quercus Pyrenaica* o *Castanea sativa*.
- *Modelo 10:* Restos leñosos originados naturalmente incluyendo leña gruesa caída como consecuencia de vendavales, plagas intensas, o excesiva madurez de la masa boscosa, con presencia de vegetación herbácea y matorral que crece entre los restos leñosos.
- *Modelo 11:* Bosque claro o aclarado con restos ligeros (diámetro menor a 7,5 cm.) recientes, de tratamientos silvícolas o de aprovechamientos, formando una capa poco compacta de escasa altura (alrededor de unos 30 cm.).
- *Modelo 12:* Predominio de restos sobre el arbolado, más pesados que en el modelo 11, formando una capa continua de mayor altura (hasta 60 cm.). Más de la mitad de las hojas están aún adheridas a las ramas sin haberse secado completamente.
- *Modelo 13:* Grandes acumulaciones de restos gruesos (diámetro mayor a 7,5 cm) y pesados, cubriendo todo el suelo.

3.6 Generación de los modelos de combustible

Reglas de clasificación

En este trabajo tan solo se van a distinguir 6 de los 13 modelos de combustible por diferentes razones. Además, los modelos de combustible 8 y 9 van a ser agrupados en un solo modelo ya que diferenciar entre 8 y 9 no es relevante al ser ambos modelos de hojarasca.

Otra de las adaptaciones que se hace respecto a los modelos de *Rothermel* es no identificar el número 3 ya que se encuentra muy poco representado espacialmente

en nuestro territorio. Por otro lado, tampoco llegarán a considerarse los modelos 10, 11, 12 y 13 por la misma razón.

A continuación se detalla el flujo de procesos de este apartado:

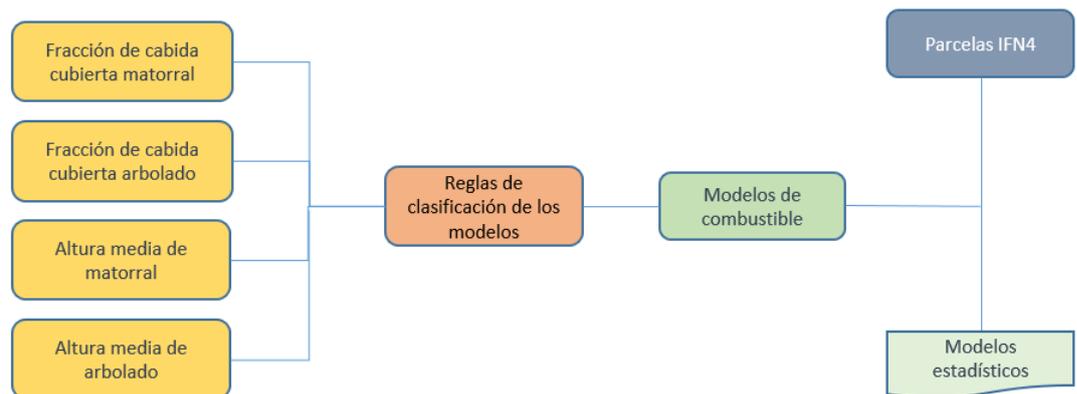


Ilustración 20: Flujo de procesos para la clasificación de los modelos de combustible

Fuente: Elaboración propia

Las reglas de clasificación consideradas han sido las siguientes:

CARACTERÍSTICAS DE COBERTURA Y ALTURA*	MODELO DE COMBUSTIBLE NFFL** A ASIGNAR
CA ≤ 30% Y CM ≤ 20%	1.- Pastizales o cultivos herbáceos
CA ≤ 30% Y < 20 CM ≤ 40%	2.- Pastizales con presencia de matorral
	3.- Pastizal espeso y alto
CA ≤ 30% Y CM > 40%:	
HM > 1.5M (Ó HA ≤ 4M)	4.- Matorral con porte alto o arbolado joven muy denso
HM < 0.6M	5.- Matorral denso con porte bajo
0.6M ≤ HM ≤ 1.5M	6.- Matorral denso con porte medio
CA > 30% Y CM > 40%	7.- Sotobosque. Matorrales de especies muy inflamables o pinares de sotobosque
CA > 30% Y CM ≤ 40%	8-9.- Hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas.
	10, 11, 12, 13.- Restos leñosos.

Ilustración 21: Propuesta de clasificación de modelos de combustible a partir de datos de parcelas IFN y LiDAR

Fuente: Elaboración propia.

*cA = cobertura arbolado; cM = cobertura matorral;
hA = altura media arbolado; hM = altura media matorral

Para la caracterización se emplea el uso de condicionales que filtren los píxeles de las variables que intervienen por su valor, quedando agrupados en cada modelo de combustible todos aquellos píxeles que cumplan las mismas condiciones. Previamente a esta clasificación se utilizó otra, en la que dentro del modelo 4 y 5 a su vez se diferenciaban otros 4 y 2 modelos más respectivamente, no pudiendo ser empleada debido a la superposición de píxeles, al cumplir algunas porciones de terreno más de una condición. Es por esto por lo que se simplifica y se deja constancia. Otra de las problemáticas surgidas fue la aparición de grupos de combustible sin clasificar debido a que no cumplían ninguna de las condiciones. Este grupo de combustible se corresponde con aquellas zonas en las que la fracción de cabida cubierta del arbolado y del matorral presentaba valores más altos no quedando esta característica encuadrada en ninguna de las reglas de clasificación.

No obstante, el valor de algunos píxeles obtenía dos modelos de clasificación, por lo que todos aquellos valores de píxel superpuestos fueron reclasificados al modelo 4 por ser este el que más se asemejaba.

Por estas razones las reglas de clasificación originales han tenido que ser modificadas quedando tal y como se ven en la ilustración 17.

Para el análisis de los resultados con las estadísticas de cada modelo se crea una tabla dinámica para crear una matriz de confusión de cada una de las parcelas.

Una vez obtenida la máscara con la clasificación de los combustibles, esta información debe de ser cruzada con las parcelas forestales del Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4)⁵, para verificar de alguna forma los resultados con algún trabajo de campo. A los puntos que representan las parcelas sobre el mapa hay que aplicarles un buffer de 25 metros para que se ajusten al tamaño real de las mismas

⁵<https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/inventario-forestal-nacional/default.aspx>

(recordar que el IFN trabaja con parcelas de campo circulares de radio variable de un máximo de 25 m).

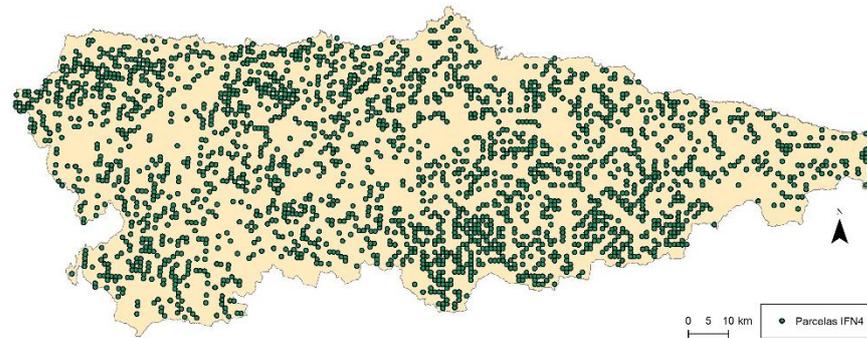


Ilustración 22: Parcelas IFN4

Fuente: Elaboración propia

Las variables forestales que intervienen en la validación son las mismas que se utilizan para la clasificación de los modelos de combustible (altura media de matorral y arbolado y fracción de cabida cubierta de matorral y arbolado).

Algoritmo de clasificación

El método Random Forest no es exactamente una técnica de clasificación o regresión, sino una combinación de otras técnicas, principalmente de regresión o árboles de clasificación. El éxito de esta técnica se basa en el uso de numerosos árboles desarrollados con diferentes variables independientes (creadas a partir de los datos LiDAR PNOA) que se seleccionan al azar del conjunto original completo de variables (Bagging y Random Subspace). El número de predictores utilizados por los árboles y el número de árboles son establecidos por los usuarios.

Este algoritmo divide las parcelas en dos grupos, de entrenamiento y de control. Con las parcelas de entrenamiento inicia un proceso de forma que a través de

las cuatro variables continuas numéricas que se usan para la generación de los modelos a partir de datos LiDAR (fracción de cabida cubierta de matorral y arbolado, y altura media de matorral y arbolado) genera los nuevos rangos para la mejor categorización de los modelos de combustible según Rothermel & Albin (1976).

Utilizando como parcelas de entrenamiento las parcelas correspondientes al IFN-4 se genera un modelo estadístico de clasificación de modelos de combustibles.

4. Resultados y Discusión

Este proyecto fue pensado para adaptar la metodología existente para el cálculo de riesgo de incendios forestales en el Principado de Asturias.

Debido a los continuos cambios del territorio, en constante evolución, y la diversidad territorial existente, la determinación de una metodología genérica para este tipo de estudios no es sencillo, consiguiendo con la propuesta aquí presentada automatizar la generación de la cartografía de la vegetación en función de los datos LiDAR proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional a través del PNOA.

Los resultados muestran la relevancia del uso de los datos LiDAR, capaces de estratificar la vegetación a la altura indicada, mostrándonos así densidades, estadísticas y alturas desde el suelo o en su defecto, por el corte indicado (matorral o arbolado).

Uno de los inconvenientes de esta metodología es la dependencia de los vuelos realizados por el PNOA, quedando estos en muchas ocasiones desactualizados e incluso escasos para el territorio.

Además, la validación de los resultados a partir de las parcelas correspondientes al Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN-4), quedan de igual forma descompensados al por un lado obtener la cartografía de los datos existentes en el año 2012, y no existir trabajos de campo o de fotointerpretación del mismo año en el que se realice el vuelo. En este caso, tanto la cartografía como la validación de resultados, pierde valor, al existir una diferencia entre los trabajos de, por un lado, 7

años y, por otro, de 2, donde las dinámicas naturales hacen que los resultados puedan no llegar a corresponderse con la realidad.

4.1 Análisis del procesado de datos LiDAR

Generación del modelo digital del terreno

La elección de los parámetros de los que deriva la generación del MDT resultan cruciales a la hora de analizar los resultados. Dependiendo de los valores dados al comando, los resultados de las variables forestales nos muestran diferentes deducciones. Se ve que para la altura media del arbolado los valores difieren bastante entre sí. Se comprueba el modelo creado y se ve claramente que los parámetros utilizados inicialmente (“Método 1”) aportan mayor calidad al proceso para la zona de arbolado, mientras que para las zonas abiertas de pasto y vegetación clara se produce un sobre-filtrado que deja en ocasiones sin puntos (datos) al archivo. Es para esta zona donde los parámetros del método 2 funcionan mejor.

Análisis de las estadísticas resultantes de la obtención de métricas LiDAR

Una vez obtenidas las estadísticas de cada variable se procede a realizar un pequeño estudio de las mismas. Previamente se deja constancia de que el Principado de Asturias cuenta con una superficie no combustible del 7.5%. Para el cálculo de este porcentaje se extrajo la superficie combustible (en km²) de la máscara de las zonas combustibles y no combustibles del principado de Asturias y se restó de la superficie total de la región. Para obtener el porcentaje basta con multiplicarlo por cien.

- Superficie total del Principado de Asturias: 10.604 km²
- Superficie total combustible del Principado de Asturias: 9.858 km²

Es por esta razón por la que se calculan los porcentajes de las variables forestales respecto al total de la superficie, y por otro lado únicamente respecto a la superficie combustible.

A continuación se realiza un pequeño análisis de los resultados más relevantes obtenidos tras la investigación:

Altura de la vegetación

Tras un pequeño análisis de la altura de la vegetación se puede observar como el 50.9 % de los combustibles se corresponde con aquellos que tienen un porte de 2 a 5 metros de altura, lo que representa el 47.3 % de la superficie del conjunto de la región. En segundo lugar aparecen aquellas especies que superan los 15 m hasta un máximo de 50, que representan un 20.3 % de la superficie combustible, siendo un 18.9 % del total de la superficie de la comunidad. Por detrás aparece la vegetación de 8-15 m y 5-8 m de altura, que representan el 17.5 % y 9.1% del conjunto de la región, respectivamente.

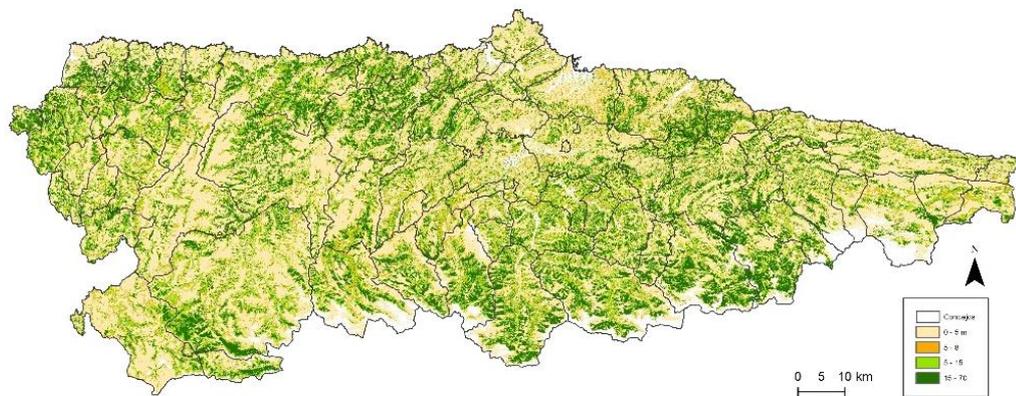


Ilustración 23: Altura de la vegetación

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Estadísticas altura de la vegetación

Altura	% sobre la zona combustible	% sobre el total de Asturias
2-5 m	50.9	47.3
5-8 m	9.8	9.1
8-15 m	18.8	17.5
>15 m	20.3	18.9

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la distribución espacial se puede ver como la vegetación de mayor altura se localiza en el interior, al sur de la región, rompiendo esta tendencia la costa occidental donde se localizan la mayoría de las plantaciones de eucalipto relacionadas con la industria del papel del concejo de Navia. Las menores alturas se localizan en las sierras interiores occidentales y en la zona central donde se encuentra el índice de urbanización más alto de la comunidad.

Continuidad vertical del arbolado total

Con el estudio de esta variable se obtienen las superficies donde la vegetación sea continua desde el suelo hasta el punto más alto de un árbol. Es por esto por lo que su estudio se presenta imprescindible a la hora de prevenir los incendios forestales. Los resultados se presentan en forma de baja o alta continuidad, siendo de 0 a 0.5% las superficies con baja CRR y de 0.5 a 1 % las de alta CRR. Los valores cercanos a cero (baja CRR) indican que las ramas de los árboles se encuentran en la rama inferior del fuste, con una FCC baja, indicando así que las copas tienen poco desarrollo (López García *et al*, 2018). En cuanto al estudio, el análisis de las estadísticas de la variable nos muestra que el 54.8% del Principado presenta una baja continuidad vertical, siendo el 26.7 % de alta continuidad. En esta variable, el 11.3% de la vegetación ha quedado sin analizar al no considerarse el estrato herbáceo (0-0.5 m) para el estudio en esta variable.

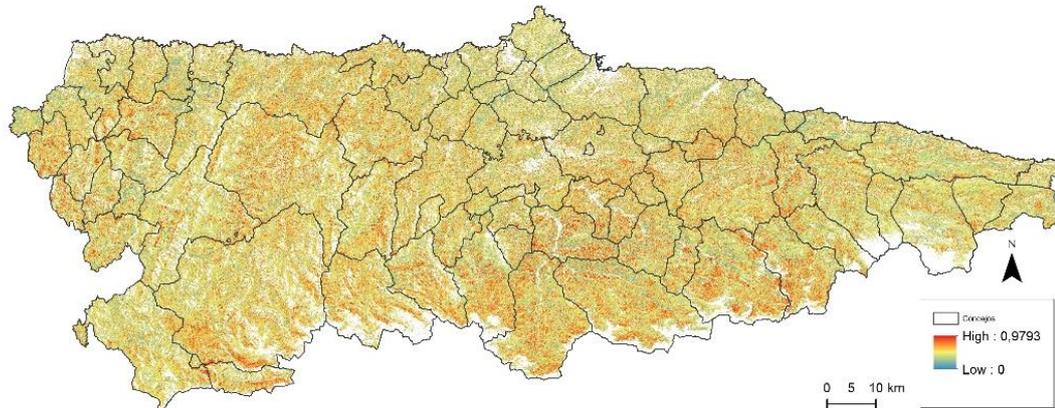


Ilustración 24: Continuidad vertical del arbolado total

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Estadísticas de la continuidad vertical del arbolado total

Altura	% sobre la zona combustible	% sobre el total de Asturias
No combustible	67.2	7
Veg < 0,5 m	32.7	11.3
Baja CRR	100	54.8
Alta CRR		26.7

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la localización espacial se ve como ambas continuidades se distribuyen uniformemente librándose de la presencia de alta continuidad vertical de la vegetación el área central de Asturias.

Fracción de cabida cubierta del arbolado:

La fracción de cabida cubierta representa el volumen de vegetación que tiene una superficie. Para el estrato arbolado, la mayoría del Principado de Asturias representa

una continuidad vertical baja con un 51.2 %. No obstante, el 23.1 % presenta una continuidad vertical elevada (70-100%) localizada en aquellas áreas donde la vegetación presenta una mayor altura.

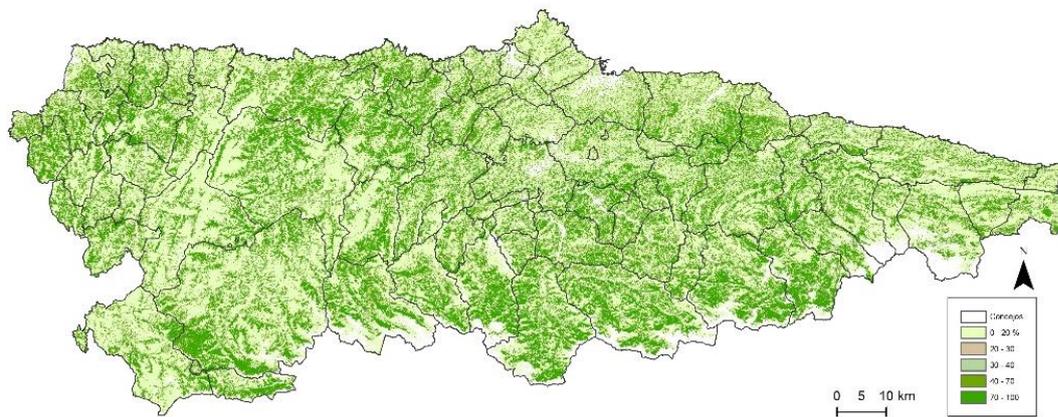


Ilustración 25: Fracción de cabida cubierta del arbolado

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Estadísticas de la fracción de cabida cubierta del arbolado

Densidad	% sobre la zona combustible	% sobre el total de Asturias
0-20 %	55.1	51.2
20-30 %	4.6	4.3
30-40 %	4.1	3.8
40-70%	11.1	10.3
70-100%	24.9	23.1
Total	100	92.9

Fuente: Elaboración propia

Las zonas con menor continuidad se localizan en las sierras occidentales, en el perímetro urbano del área central y en la parte más oriental de la región.

Fracción de cabida cubierta del matorral:

Al igual que la anterior, esta variable representa el volumen de vegetación que tiene una superficie, en este caso para el estrato de matorral (0.5-2 m). El análisis de las estadísticas muestra que el 58.7% de la superficie de Asturias presenta una fracción de cabida cubierta de matorral muy baja, un 9.7 % baja y un 7.7% media. Las zonas con una fracción de cabida cubierta alta o muy alta apenas suman el 12% del total de superficie, localizándose estas de forma uniforme a lo largo de la región.

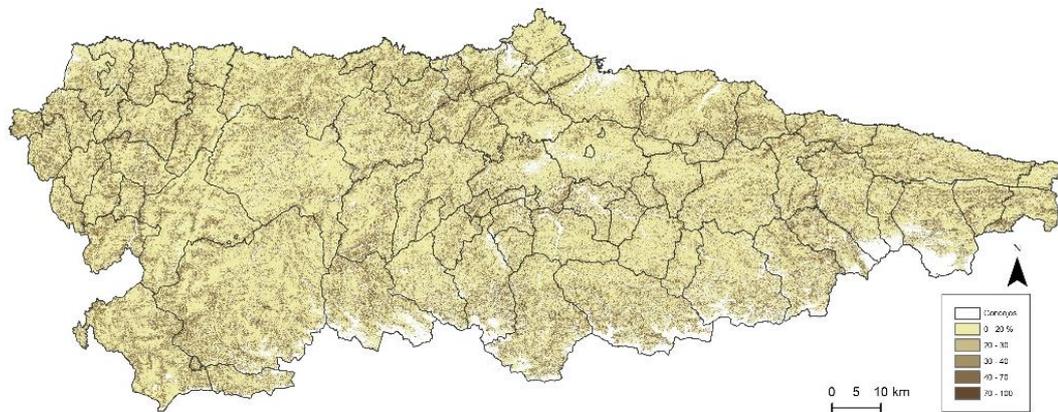


Ilustración 26: Fracción de cabida cubierta del matorral

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Estadísticas de la fracción de cabida cubierta del matorral

Densidad	% sobre la zona combustible	% sobre el total de asturias
0-20 %	65.7	58.7
20-30 %	10.9	9.7
30-40 %	8.6	7.7
40-70%	12.2	10.9
70-100%	2.4	2.1
No matorral		3.0

Fuente: Elaboración propia

Altura del arbolado en el percentil 95:

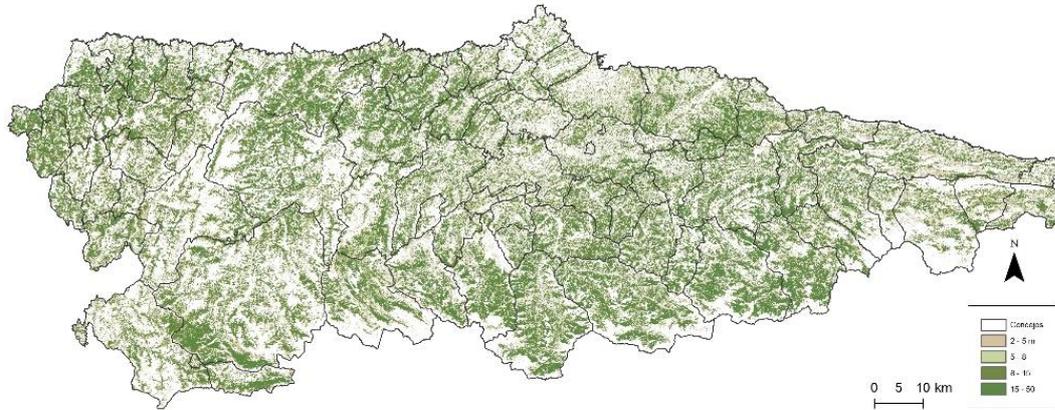


Ilustración 27: Altura del arbolado en el percentil 95

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Estadísticas de la altura del arbolado en el percentil 95

Altura	% sobre la zona combustible	% sobre el total de asturias
2-5 m	15.9	8.2
5-8 m	16.3	8.4
8-15 m	33.7	17.3
>15 m	33.9	17.4
No arbolado		40.9

Fuente: Elaboración propia

La altura del arbolado en el percentil 95 muestra la altura dominante de la masa. Asturias cuenta con una superficie arbolada del 59,1 %. A través del estudio se puede ver como los estratos que van desde los 8 hasta los 15 y desde los 15 hasta 50 metros se reparten un 34 % del total de la superficie de la región. Especialmente estos estratos se reparten en aquellos lugares donde la altura media de la vegetación es más alta, la costa occidental, la reserva natural integral de Muniellos al suroccidente, el entorno del Parque natural de Redes o la costa centro oriental de la región son algunos de ellos.

En cuanto a los estratos de alturas más bajas, suman un 16% del total, localizándose en las inmediaciones del área central y las sierras occidentales y orientales del Principado.

Altura media del arbolado:



Ilustración 28: Altura media del arbolado

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Estadísticas de la altura media del arbolado

Altura	% sobre la zona combustible	% sobre el total de asturias
2-5 m	35.7	20.4
5-8 m	21.1	12.1
8-15 m	30.2	17.3
>15 m	12.9	7.4

Fuente: Elaboración propia

La altura media del arbolado, que va desde los 2 hasta los 50 metros, se distribuye uniformemente a lo largo del estrato. La mayor representación la tienen los árboles que van desde los 2 a los 5 metros, los cuales ocupan un 20.4% de la superficie total del Principado. Le siguen muy de cerca aquellos que van desde los 8 a los 15 metros

de altura con un 17.3 % y los que van de 5-8 m con un 12.1%. El arbolado considerado como alto, que supera los 15 m de altura, apenas supera el 7.4 % de la superficie de la región.

En general, los resultados analizados por alturas indican que Asturias no presenta una superficie arbolada media caracterizada por el gran porte de sus árboles, localizándose ésta exclusivamente en la costa occidental, relacionada con las plantaciones de eucalipto, en el suroccidente y la cara norte occidental de la cordillera Cantábrica.

4.2 Análisis y validación de los modelos de combustible

4.2.1 Reglas de clasificación

Una vez analizados los resultados de las variables se procede a hacer un pequeño estudio que verifique la verdad de la metodología. Para una correcta validación de los resultados obtenidos se deben de calcular las estadísticas de zona de las variables que intervienen en la clasificación de los combustibles. Así pues, se crea una hoja de cálculo donde se exportan las medias de la fracción de cabida cubierta del matorral y arbolado, y la altura media del matorral y del arbolado. Además, debe de calcularse también la moda de la máscara donde se encuentran clasificados los modelos.

A continuación se muestra una matriz de confusión de los resultados anteriores:

Tabla 13: Matriz de confusión reglas de clasificación

MC	Refer.	Classified	Correct (Xii)	Producers	Users	Omission Error	Comission Error	(Xi+)*(X+i)	Cond Kappa
1	1	172	0	0,00	0,00	100,00	100,00	172	-0,19
2	13	66	1	7,69	1,52	92,31	98,48	858	0,02
3	3	0	0	0,00	#iDIV/0!	100,00	#iDIV/0!	0	0,00
4	27	16	0	0,00	0,00	100,00	100,00	432	-0,01
5	229	0	0	0,00	#iDIV/0!	100,00	#iDIV/0!	0	0,00
6	446	14	9	2,02	64,29	97,98	35,71	6244	0,01
7	122	173	17	13,93	9,83	86,07	90,17	21106	-0,02
8	249	639	179	71,89	28,01	28,11	71,99	159111	0,32
	1090	1090	206	Precision	Recall			187923	
				Omission	Comisión			18,90	0,0366
								Overall accuracy	Kappa
								Correctly Classified Instances	Kappa statistic

Fuente: elaboración propia

La matriz de confusión se lee de la siguiente forma:

- La segunda columna corresponde con el número de parcelas de cada modelo según el trabajo del IFN4, mientras que la segunda muestra el número de parcelas de cada modelo según la metodología de nuestro trabajo. La tercera representa el número de parcelas que en ambos métodos se encuadran en el mismo modelo de combustible.
- La precisión del productor, en este caso las parcelas del IFN4, es la precisión calculada por clase de combustible, son aquellos lugares de un modelo de combustible clasificado correctamente dividido por el total de lugares de referencia correspondientes a ese modelo, su error asociado es el error de omisión.
- La precisión del usuario, en este caso, es la capacidad de predicción del algoritmo desarrollado en esta metodología. Su error asociado es el error de comisión.
- El error de omisión se interpreta como un pixel que correspondiendo a un modelo de combustible, no fue clasificado de esa manera.

- El error de comisión son los píxeles son los píxeles clasificados como un modelo de combustible al que no pertenecen.
- En este caso, de un total de 1090 parcelas, 206 se corresponden con el mismo modelo con ambos métodos por lo que tan solo el 18.90 % tienen una coincidencia.

4.2.2 Algoritmo de clasificación

Dado que los modelos de combustible obtenidos a partir de las reglas de clasificación detallados nos muestran tan solo un 18.9% de validación, se procede a realizar un estudio estadístico a través del algoritmo de clasificación “Random Forest”.

Ilustración 29: Resultados “Random Forest”

=== Stratified cross-validation ===		
=== Summary ===		
Correctly Classified Instances	477	43.7615 %
Incorrectly Classified Instances	613	56.2385 %
Kappa statistic	0.1698	
Mean absolute error	0.1675	
Root mean squared error	0.3	
Relative absolute error	92.5088 %	
Root relative squared error	99.8049 %	
Total Number of Instances	1090	

Fuente: Elaboración propia

La precisión del modelo es del 43.7%. Aun siendo un resultado que nos muestra un porcentaje bajo, la mejora respecto al primer modelo es considerable, aunque no suficiente.

Tabla 14: Matriz de confusión "Random Forest"

MC	Refer.	Classified	Correct (Xii)	Producers	Users	Omission Error	Comission Error	(Xi+)*(X+i)	Cond_Kappa
1	0	1	0	#j DIV/0!	0,00	#j DIV/0!	100,00	0	#j DIV/0!
2	7	13	3	42,86	23,08	57,14	76,92	91	0,42
3	0	3	0	#j DIV/0!	0,00	#j DIV/0!	100,00	0	#j DIV/0!
4	2	27	0	0,00	0,00	100,00	100,00	54	-0,03
5	163	229	47	28,83	20,52	71,17	79,48	37327	0,10
6	622	446	305	49,04	68,39	50,96	31,61	277412	0,14
7	42	122	15	35,71	12,30	64,29	87,70	5124	0,28
8	254	249	107	42,13	42,97	57,87	57,03	63246	0,25
	1090	1090	477	Precision	Recall			383254	
				Omission	Comisión		I	43,76	0,1698
								Overall accuracy	Kappa
								Correctly Classified Instances	Kappa statistic

Fuente: Elaboración propia

Los modelos que presentan un menor error de clasificación son: 6, 2, 8,7 respectivamente (aunque superan el 50% de error).

Las razones por las que los modelos presenten porcentajes (%) de ajuste tan bajos en la primera aproximación de este trabajo pueden ser varias:

1. La incorrecta georreferenciación de las parcelas que hacen que los puntos representados en el mapa se asocien con modelos de combustible distintos a donde se localizan.
2. El desfase temporal de los datos que unido a la dinámica natural de la vegetación, hace que los valores presentes en las bases de datos no se ajusten con la realidad, por lo que se debería de hacer un ajuste temporal basado en otro tipo de técnicas como podrían ser las derivadas de los sensores remotos.
3. En alguno de los casos la densidad de puntos ofrecida por el PNOA, para el estudio de algunas masas arboladas de la región queda escasa.

4. El uso de modelos de clasificación de combustible generales, aunque adaptados a la cornisa cantábrica española, que no caractericen algunas de las masas vegetales presentes en la región.

4.3 Posibles líneas de mejora en la generación de modelos de combustible

Debido a la obtención de modelos que nos muestran unos porcentajes de acierto de clasificación de modelos no demasiado optimistas, se procede en este apartado a detallar algunas de las líneas de desarrollo que se podrían abordar.

Con este fin, se trataría de depurar las bases de datos utilizadas con las cuatro variables creadas a partir de los datos LiDAR. A estas deberían de sumarse otras variables como la capa satélite con índices de NDVI, e información espectral de tantas bandas como tenga el sensor pasivo, variables topográficas como la pendiente, orientación, rugosidad, curvatura del terreno, y otras tantas variables auxiliares como se puedan imaginar: climatológicas, litológicas... con el que formar una base de datos con la que construir un modelo estadístico que mejorase los resultados serían recomendables.

Otra de las líneas de mejora que se podrían seguir sería la realización de un trabajo de campo complementario al estudio de gabinete en el que se muestrean un número n de parcelas que de una representación lo suficientemente amplia que represente todos los posibles modelos presentes en el Principado de Asturias. Posteriormente se debería interseccionar la geolocalización de estas parcelas con la base de datos mejorada con las variables auxiliares que de igual forma mejoraría notablemente los resultados.

Una tercera mejora pasaría por verificar la correspondencia de cada parcela con el modelo de combustible asociado por el IFN y por el método. De esta forma se eliminarían aquellas parcelas en las que los modelos no se correspondiesen con la realidad, quedándonos con aquellas en las que tanto las parcelas del IFN-4 como el

algoritmo de clasificación muestran el modelo de combustible correcto, lo que a la hora de cruzar de nuevo la geolocalización de las parcelas con la base de datos con las variables calculadas, mejoraría considerablemente el % de los resultados.

Por último, en una línea de futuro se debería de conseguir implementar el modelo estadístico a nivel pixel, al igual que se hizo con las variables forestales calculadas para la construcción de los modelos.

5. Conclusiones

- I. Destacar el gran potencial de los datos LiDAR para el estudio de variables forestales a gran escala.
- II. La descompensaci3n entre los a1os de obtenci3n de datos y trabajos de campo que hacen que los resultados del estudio no puedan ser comprobados en campo.
- III. Limitaci3n de pulsos y vuelos LiDAR para el territorio asturiano.
- IV. Destacar la importancia de una correcta elecci3n de los par3metros g , w y sus iteraciones en la generaci3n del modelo digital del terreno, as3 como su escasa bibliograf3a.
- V. La precisi3n del modelo respecto a los datos de campo no es muy elevada.
- VI. La metodolog3a utilizada para esta investigaci3n puede considerarse como 3ptima para estudios regionales o incluso globales, donde el grado de detalle no tenga que ser tan preciso. Sin embargo, debido a las caracter3sticas de los datos, el estudio de casos locales a gran escala, precisa de un trabajo de campo que valide a los resultados generados con dicha metodolog3a.
- VII. En un perfecto escenario de trabajo lo correcto consistir3a en incorporar datos procedentes de sensores remotos pasivos correspondientes al sat3lite Sentinel 2 con el que establecer una clasificaci3n de coberturas. Complementariamente se deben de realizar trabajos de campo en parcelas forestales aleatorias que nos probasen de una verdad de datos absolutos con los que entrenar al sensor y as3 extrapolar el trabajo a la totalidad del 3rea de estudio.

Referencias

- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Valdecantos-Dema, A., Pando-Moreno, M., Aguirre-Calderón, O., & Treviño-Garza, E. J. (2011). Caracterización de regeneración leñosa post-incendio de un ecosistema templado del Parque Ecológico Chipinque, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(1), 31-39.
- Álvarez Álvarez, P., & Canga Libano, E. (2016). Localización de árbol individual a partir de datos LiDAR.
- Álvarez, M. A., & Marquínez, J. (2007). Impacto de los incendios forestales en Asturias. *Análisis de los Últimos*, 30.
- Baltsavias, E.P. (1999a). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 83-94. DOI: 10.1016/S0924-2716 (99)00014-3
- Baltsavias, E.P. (1999b). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 199-214. DOI: 10.1016/s0924-2716 (99)00015-5
- Baltsavias, E.P. (1999c). Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 164-198. DOI: 10.1016/S0924-2716 (99)00016-7.
- Colina, A. (2018). Los incendios forestales en Asturias en los últimos 30 años. DOI: 10.13140/RG.2.2.25395.07203
- Diez Roldán, J. C. (2017). Generación de una cartografía para la monitorización de coberturas vegetales arbóreas en el Principado de Asturias.
- Enríquez, E. y Del Moral, L. (coords.). (2012). *Los Incendios Forestales en España: decenio 2001-2010*. Área de Defensa contra Incendios Forestales (ADCIF) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Erdody, T. L., & Moskal, L. M. (2010). Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 725-737.
- Flannigan, M. D., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2000). Climate change and forest fires. *Science of the total environment*, 262(3), 221-229.
- Fernández, J., & Siabato, W. (2011). Procesamiento y accesibilidad de datos LiDAR a través de aplicaciones distribuidas. Integración del estándar OpenGIS Web Processing Service y la Arquitectura GRID Computing. Madrid, Spain.
- Fernández-Montes, S., Rodrigo, F. S., Seubert, S., & Sousa, P. M. (2013). Spring and summer extreme temperatures in Iberia during last century in relation to circulation types. *Atmospheric Research*, 127, 154-177.
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 121-139.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, 63(2-3), 90-104.

González-Ferreiro, E., Diéguez-Aranda, U., Crecente-Campo, F., Barreiro-Fernández, L., Miranda, D., & Castedo-Dorado, F. (2014). Modelling canopy fuel variables for *Pinus radiata* D. Don in NW Spain with low-density LiDAR data. *International journal of wildland fire*, 23(3), 350-362.

Hyyppä, J., Hyyppä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J., & Maltamo, M. (2004). Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 82-89.

Hyyppä, J., Yu, X., Hyyppä, H., & Maltamo, M. (2006). Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. In: T., Koukal, & W., Schneider (Eds.), *Proceedings of the Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*. Viena, pp. 1-16.

Instituto Geográfico Nacional.

Jakubowski, M. K., Guo, Q., Collins, B., Stephens, S., & Kelly, M. (2013). Predicting surface fuel models and fuel metrics using Lidar and CIR imagery in a dense, mountainous forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(1), 37-49.

Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., & Harding, D.J. (2002). LiDAR remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, 52, 19-30. DOI: 10.1641/0006-3568 (2002)052[0019: LRSFES]2.0.CO;2

Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in physical geography*, 27(1), 88-106.

López García, M. J., Carmona, P., Salom, J., & Albertos, J. M. (2018). TECNOLOGÍA LIDAR COMO FUENTE DE DATOS PARA LA PREVENCIÓN DE LOS INCENDIOS EN LA INTERFAZ URBANO FORESTAL. *Tecnologías de la información geográfica: Perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento*, 87.

Maltamo, M., Næsset, E., & Vauhkonen, J. (2014). *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*. Springer, London, 464 pp.

Martín, V. C., Liaño, C. D., Codrón, J. G., & Álvarez, D. R. (2009). Clima e incendios forestales en Cantabria: evolución y tendencias recientes. *Pirineos*, 164, 33-48.

McGaughey, R. J. (2009). FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Seattle, WA, USA, 123(2).

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Montealegre Gracia, A. L., Lamelas Gracia, M. T., & Fernández, R. *Aplicaciones forestales de los datos LiDAR-PNOA en ambiente mediterráneo: su filtrado e interpolación y el modelado de parámetros estructurales con apoyo en trabajo de campo* (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza, Prensas de la Universidad).

Pérez Fiz, F., Boscolo, R., Bladé, I., Cacho, I., Castro Díez, Y., Gomis, D., & Sánchez, E. (2010). Clima en España: pasado, presente y futuro. Informe de Evaluación del Cambio Climático Regional.

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.

Renslow, M. (2013). *Manual of airborne topographic LiDAR*. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 504 pp.

Quintanilla Garriel, E. (2019). Análisis y Evaluación de Interfaz Urbano Forestal en caso de incendio en el Principado de Asturias

Rodríguez, F y Fernández, A. (2013). Introducción a la tecnología y visualización de datos. Material docente del "Curso Práctico de Aplicaciones Forestales de la tecnología LiDAR. Agresta S. Coop. Y Dielmo 3D."

Salgado Fernández, L. (2016). Valoración del riesgo por incendio forestal en el interfaz urbano-forestal.

- Shan, J., & Toth, C.K. (2008). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press, Boca Raton, 616 pp.
- Seielstad, C. A., & Queen, L. P. (2003). Using airborne laser altimetry to determine fuel models for estimating fire behavior. *Journal of Forestry*, 101(4), 10-15.
- Tejido Murias, I. (2017). Estimación del volumen de eucalipto en Asturias mediante el uso de modelos elaborados a partir de los datos delifn-4 y de sensores remotos.
- Vélez, R. (2000). *La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias* (No. 577.20946 D313). McGraw-Hill.
- Vosselman, G., & Maas, H.G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Dun beath, Escocia, 318 pp:
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 68-82.
- Wulder, M.A., White, J.C., Nelson, R.F., Næsset, E., Ørka, H.O., Coops, N.C., Hilker, T., Bater, C.W., & Gobakken, T. (2012). LiDAR sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, 121, 196–209. doi:10.1016/j.rse.2012.02.001