

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MODELIZACIÓN DE COMBUSTIBLE Y SIMULACIÓN DE INCENDIOS EN EL BARRANCO DE TAGARINA (SELLA, ALICANTE)

Autora: Silvia Cano Lucas

Directores: Aitor Valdeón Vélez y Roberto Serrano Notivoli

**Máster Universitario en
Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio:
sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre de 2019



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Los incendios forestales y el incremento de estos es uno de los problemas más frecuentes de la cuenca mediterránea, que se ha visto incrementado en las últimas décadas debido al éxodo rural y el abandono de tierras. En este trabajo se realiza un análisis del estrato de la vegetación del bosque mediterráneo, no desde una manera óptica, sino analizando la estructura interna del dosel vegetal, para realizar un análisis exhaustivo y poder generar información sobre los modelos de combustible dictados por Rothermel (1972) en el barranco de la Tagarina (Sella, Alicante). La información necesaria para la elaboración de la capa sobre modelos de combustible se ha obtenido del proyecto LiDAR – PNOA y se ha procesado a través del software FUSION, especializado en zonas forestales. Una vez se ha obtenido la información necesaria para trabajar con el modelo de combustible, se ha hecho uso del programa de simulaciones de incendio Flammap para conocer las variables principales que se darían en caso de repetirse el incendio ocurrido en 1995 y poder así tomar medidas para la prevención de incendios forestales.

Palabras Clave: LiDAR, dosel vegetal, modelos combustibles, Flammap, FUSION.

Abstract

Forest fires and the increase of these ones is one of the most frequent problems in the Mediterranean basin, that has been seen increased in recent decades due to rural exodus and land abandonment. In this work is performed an analysis of the Mediterranean forest vegetation stratum, not from an optical way, but by analyzing the internal structure of the canopy, to carry out an exhaustive analysis and be able to generate information on the fuel models dictated by Rothermel (1972) in the ravine of the Tagarina (Sella, Alicante). The necessary information for the development of the fuel models layer has been obtained from the LiDAR-PNOA project and has been processed through the FUSION software, specialized in forest areas. Once the necessary information is obtained so as to work with the fuel model, the Flammap fire simulation program has been used to know the main variables that would occur if the fire occurred in 1995 was repeated and thus be able to take measures for forest fires prevention.

Key Words: LiDAR, canopy, fuel models, Flammap, FUSION.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	2
3. MARCO TEÓRICO	2
3.1. El proyecto LiDAR-PNOA	2
3.2. Los modelos de combustible.....	3
4. OBJETIVOS DEL TRABAJO	5
5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
6. MATERIAL EMPLEADO	6
6.1. Softwares utilizados	6
6.2. Datos de partida	7
7. METODOLOGÍA	8
7.1. Trabajo de campo	8
7.2. Trabajo de gabinete	8
7.2.1 Fotointerpretación	9
7.2.2 Procesado sobre los datos LiDAR - PNOA.....	9
7.2.3 Criterios de asignación de los modelos de combustible del barranco de la Tagarina	14
7.2.4 Aplicación de los modelos según el sistema Prometheus.....	14
8. SIMULADOR DE INCENDIOS FLAMMAP	16
8.1 Parámetros para crear el archivo Landscape File (LCP)	17
8.1.1 Parámetros topográficos a partir de datos LiDAR	18
8.1.2 Parámetros relacionados con la vegetación extraídos a partir de datos LiDAR.....	18
8.2 Otros parámetros necesarios para el funcionamiento del archivo LCP	20
9. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN EN FLAMMAP	23
9.1 Principales ejes de propagación del incendio.....	23
9.2 Longitud de la llama.....	24
9.3 Alcance del incendio	25
9.4 Velocidad de propagación	25
9.5 Actividad del fuego en las copas de los arboles	26
9. DISCUSIÓN	27
10. CONCLUSIONES Y PREVISIONES DE FUTURO	28
BIBLIOGRAFÍA	30
ANEXOS	32

Índice de figuras

Figura 1: Ejemplo de imagen de intensidad del barranco de la Tagarina realizada con el software FUSION a partir de los datos LiDAR-PNOA.	3
Figura 2: Localización geográfica del barranco caso de estudio. Fuente: PNOA, IGN. Elaboración propia.	5
Figura 3: Diagrama general de los métodos utilizados para extraer la cartografía de combustibles.	8
Figura 4: Mapa de modelos de combustible presentes en Tagarina realizado mediante fotointerpretación.	9
Figura 5: Ejemplo de código utilizado en batch en ArcGis	10
Figura 6: Altura media de la vegetación. En tonos amarillentos las zonas con vegetación más bajas y en tonos azulados las zonas con mayor altura.	12
Figura 7: Fracción de cabida cubierta (FCC) del matorral, los valores oscilan entre 0 y 100. Los tonos más azulados hacen referencia a una fracción de cabida cubierta mayor, por el contrario, los tonos amarillos a una fracción de cabida cubierta baja.	13
Figura 8: Altura media del matorral en el barranco de Tagarina. En tonos más azulados los matorrales con mayor altura.	13
Figura 9: Modelo Prometheus utilizado para la clasificación de combustible. (Arroyo, Pascual, & Manzarena, 2008)	15
Figura 10: Metodología utilizada para la elaboración del mapa de combustible. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 11: Mapa final de combustibles presentes en el barranco de Tagarina mediante la metodología de combinación entre fotointerpretación y datos LiDAR.	16
Figura 12: Zona de estudio sobre la que se va a trabajar en el Simulador Flammap	17
Figura 13: Creación del archivo de paisaje LCP en Flammap.	18
Figura 14: Principales ejes de propagación del incendio (en color amarillo) a partir del punto donde se origina el mismo.	23
Figura 15: Ejes secundarios de propagación del fuego.	24
Figura 16: Longitud de la llama (m) obtenida en el simulador Flammap para el Barranco de la Tagarina.	24
Figura 17: Alcance del incendio desde el punto de inicio. Clasificado por horas desde que se inicia hasta que se apaga.	25
Figura 18: Velocidad de propagación del incendio calculado en metros por minuto en el simulador Flammap.	26
Figura 19: Actividad de las copas en el barranco de Tagarina obtenido mediante el simulador de incendios Flammap.	27

Índice de tablas

Tabla 1: Tablas de la caracterización de los modelos de combustible según Rothermel en 1972 (Conselleria de Medi Ambient, 1996).....	4
Tabla 2: Tabla correspondiente con los valores de la leyenda de vegetación según el Plan de Selvicultura Preventiva de incendios en los sistemas forestales de la Comunidad Valenciana (Conselleria de Medi Ambient, 1996).....	7
Tabla 3: Clases predefinidas de los datos LiDAR – PNOA para la nube de puntos.	10
Tabla 4: Parámetros utilizados para la clasificación de la vegetación. Fuente: Elaboración propia.....	11
Tabla 5: Valores reclasificados de los ráster haciendo uso de ArcGis.	14

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son una de las amenazas fundamentales de los ecosistemas, que ocasionan un gran impacto tanto ecológico, como económico y social. Por esta razón, disponer de herramientas fiables que permitan predecir el comportamiento del fuego, es un potencial a la hora de prevenir incendios forestales (Marino, Ranz Vega, Tomé, & Noriega, 2016).

Los incendios forestales son generados a partir del fuego, debido a varios parámetros que inciden en su potencia y severidad, entre ellos se encuentra el combustible, la fuente de calor y el oxígeno. En los incendios forestales, la fuente de calor puede provenir de elementos naturales como puede ser un rayo o provenir de elementos antrópicos, como pueden ser colillas o vidrios. Por otro lado, la variable oxígeno es proporcionada por la atmosfera y, por último, los combustibles representan la materia orgánica presente en el medio natural y que se puede quemar en un proceso de combustión, tanto viva (matorral, arbustos, ramas) como muerta (truncos) (Hoffrén Mansoa, 2018).

Los ecosistemas mediterráneos poseen un clima que se sitúa entre la transición del templado oceánico y el templado seco, siendo su característica de mayor importancia la coincidencia de la época seca con la cálida. Este hecho, propicia que los ecosistemas mediterráneos sean más susceptibles que otros a los incendios forestales, debido a la pérdida de humedad en la vegetación, junto a una naturaleza inflamable, entre otros factores. Los incendios forestales se empiezan a incrementar en la cuenca mediterránea a partir de mediados del siglo XX, ya que, hasta entonces y en ocasiones, los vecinos explotaban los recursos del bosque para obtener leña, madera y pasto, y dejan de hacerlo. Además, también se quemaba la vegetación del suelo para sembrar cereales, frutales u olivos. El resultado de estas prácticas era un paisaje con bajo riesgo de incendio, debido a la menor masa forestal y, por tanto, menor cantidad de combustible. Es en los años 60, cuando la industrialización y el éxodo rural dan lugar al abandono de campos y zonas de montaña, que automáticamente se traducen en un incremento del dosel vegetal. A este hecho, hay que sumarle, la cantidad de nuevas normas y leyes que rigen y restringen las talas, zonas de pasto y caza que han incrementado el riesgo de incendio. Como consecuencias directas, se observa un aumento de los incendios forestales cuando las condiciones climáticas son favorables, a pesar de invertir en sistemas de prevención como son las pistas forestales, cortafuegos, medios de extinción e infraestructuras. Por ello, quizás sea el momento de investigar e invertir en nuevas medidas para poder prevenir incendios de una manera concreta, predecible y económicamente aceptable (Bodí, Cerdà, Mataix Solera, & Doerr, 2012).

Uno de los métodos de prevención más factibles sería la gestión del combustible, es decir, la manipulación, modificación y reducción de la vegetación inflamable. Gestionar de una manera correcta el combustible es de vital importancia, ya que se trata del único factor que incide sobre el comportamiento del fuego, y sobre el que se puede actuar. El combustible es, por tanto, el factor principal que determina si se inicia un incendio, y depende de la cantidad de combustible, la dificultad para controlarlo (Novo & Marey, 2014).

De esta manera, se va a extraer la información necesaria de una fuente gratuita de datos como es el CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica), que se va a procesar para conocer la estructura del combustible predominante en el barranco de Tagarina.

2. JUSTIFICACIÓN

Los incendios forestales ocasionan importantes afecciones a escala local, proponiendo la necesidad de recurrir a análisis territoriales encaminados a la prevención y protección de los ecosistemas forestales. A diferencia de otros riesgos, los incendios forestales son uno de los peligros naturales más predecibles, por tanto, permiten anticiparnos en cierta medida a sus daños y peligrosidades. A través del conocimiento del territorio y de los factores que determinan el comportamiento del fuego, concretamente el combustible se podrá realizar una gestión adecuada y eficiente de los bosques (Vélez Muóz, 2009).

Se ha centrado el trabajo en la estimación de los modelos de combustible según Rothermel (Rothermel, 1972) pero adaptados al proyecto europeo Prometheus (Arroyo, Pascual, & Manzarena, 2008) en función del dosel vegetal a partir de datos LiDAR- PNOA.

Una vez analizada la estructura interna de la vegetación, la finalidad ha sido proporcionar cartografía de modelos de combustible que pueda ser empleada para simular un incendio, y analizar su extensión e intensidad.

La representación de los resultados obtenidos en cartografías a partir de los Sistemas de Información Geográfica y de la teledetección, permite observar la distribución espacial del combustible sobre una superficie forestal que, integrándola en otros documentos de planificación territorial, da como resultado una herramienta de enorme poder para la gestión del territorio y la mitigación de los incendios forestales. Este trabajo constituye el resultado de la colaboración realizada en la empresa Inteligencia Climática (Alicante), especializada en planes y proyectos de emergencia contra incendios forestales. Se ha seleccionado este tema de estudio con la finalidad de encontrar otras formas de mejorar y complementar a los planes de prevención y planificación de riesgos naturales. Se han seguido las pautas en el trabajo según lo aprendido en la empresa siendo la tarea principal investigar acerca de los modelos de combustible, con la finalidad de adaptarla a un simulador de incendios aplicando los conocimientos adquiridos en el máster sobre Tecnologías de la Información Geográfica.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. El proyecto LiDAR-PNOA

El sistema LiDAR (Light Detection And Ranging) es un sistema activo de detección remota basado en un escáner láser aeroportado. En esta tecnología se combina un sistema inercial con un sistema GPS, que trabaja en tiempo real y permite calcular la posición de un objeto midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso láser y su retorno al mismo. Esta capacidad de modelizar el terreno desde el aire de manera continua representa una gran ventaja en lo que se refiere a estudios sobre masas forestales, ya que su capacidad de penetración en la cubierta vegetal permite capturar información de diferentes estratos de vegetación y del suelo. Es una herramienta con mucho potencial, ya que posee información muy concreta sobre la estructura de la masa vegetal (Tomé Morán, Fernandez Landa, & Ranz Vega, 2014).

Los sensores LiDAR aerotransportados se colocan en una aeronave como un avión, helicóptero o incluso un dron controlado de forma remota, y realizan un escaneo transversal que, junto con el movimiento longitudinal del avión, les permite generar una nube de puntos tridimensionales y muy densa con una gran capacidad de precisión. El sensor LiDAR es capaz de emitir hasta 200.000 pulsos láser por segundo y capturar coordenadas x, z e y (Rosales León & Rodrigo Bello, 2012). Los sistemas más modernos para aplicaciones topográficas y ambientales, también denominadas “multi-retorno” pueden llegar a registrar hasta cinco retornos por pulso. Esto sucede de la siguiente manera: cuando el pulso choca con un objeto, una parte de la energía del pulso se refleja hacia el receptor y se registra como el primer eco o pulso. Esta situación varía cuando se trata de un objeto poroso, como es la vegetación. La vegetación no bloquea completamente el pulso, por tanto, la energía continúa su recorrido, pudiendo ser reflejada por los objetos más altos, que corresponden con la superficie del dosel y por los intermedios y

bajos, es decir, segundo, tercer o cuarto retorno, que corresponden con las ramas, hojas y sotobosque (Montealegre, 2017).

Cuando se trata de una zona de gran extensión, la aeronave realiza varias pasadas sobre el mismo punto o zona, creando cierto solape entre ellas, muchas veces llegando hasta un 50% de la superficie o más, con el objetivo principal de que no existan zonas con huecos, lo que se traduce a zonas sin información. Hay que tener en cuenta que los retornos no son suficientes para construir un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que se trata de una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 2019) Por esta razón el equipo Airbone Láser Scanning (ALS) lleva incorporado un equipo con un sistema de posicionamiento global GPS (Global Positioning System) y un sistema inercial de navegación INS (Inertial Navigation System) con una unidad de medición inercial IMU para el geoposicionamiento (Inertial Measurement Unit) (Montealegre, 2017)

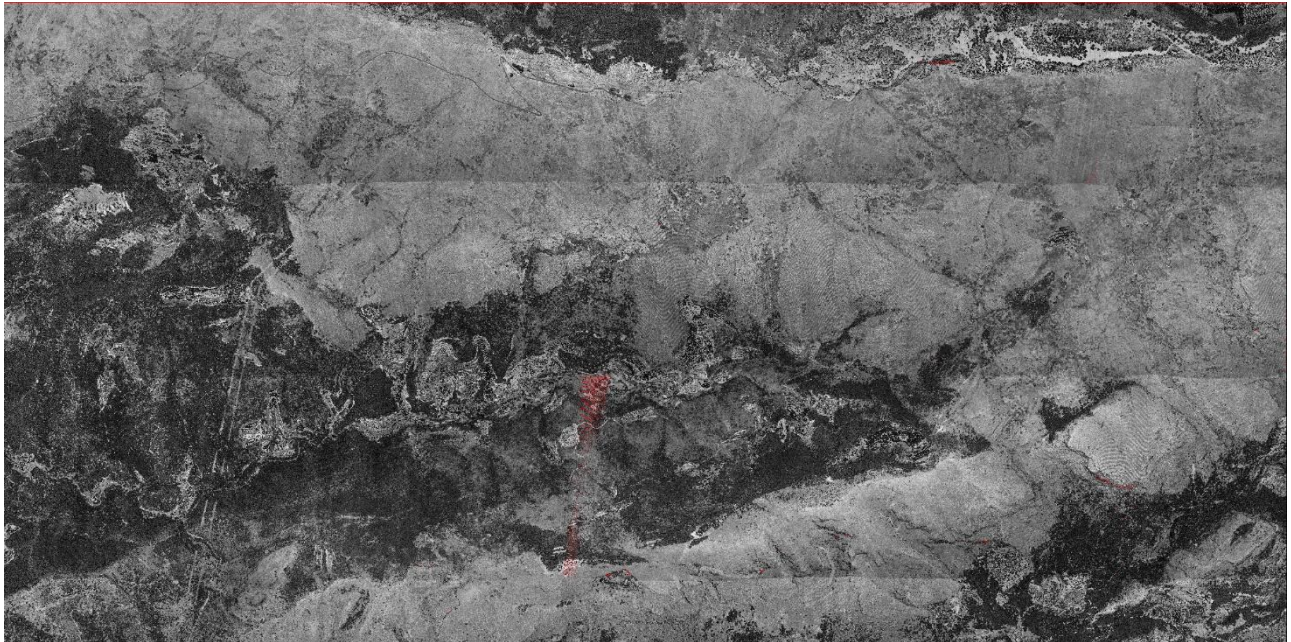


Figura 1: Ejemplo de imagen de intensidad del barranco de la Tagarina realizada con el software *FUSION* a partir de los datos LiDAR-PNOA.

En la figura 1, se muestra una imagen en tonalidades grises. Esta imagen representa el barranco de Tagarina y alrededores, donde las zonas más oscurecidas corresponden a las zonas donde existe un mayor dosel vegetal, ya que hay más retornos del pulso láser, es decir una mayor intensidad de pulsos equivalente a una mayor intensidad de objetos que tomar. Como se verá posteriormente, estas son las zonas más afectadas debido a una mayor presencia de combustible en caso de ocurrir un incendio forestal. Por otro lado, los puntos rojos indican ausencia de valor de intensidad, en este caso se trata de unas pequeñas balsas localizadas en las zonas de cultivo, ya que en las superficies de agua el pulso emitido es reflejado de forma especular y no penetra en el agua (Ruiz García, 2009).

3.2. Los modelos de combustible

El combustible se define en función de la biomasa, de la composición en diferentes tamaños o en el contenido de la humedad promedio. La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica representan una valiosa herramienta para la prevención y evaluación de un incendio mediante un inventario de modelos de combustible. La utilización conjunta de los SIG, teledetección y nube de puntos LiDAR conforman un sistema de información eficaz y capaz de resolver cuestiones de diverso tipo, por lo que constituyen un recurso de gran interés para la cartografía de modelos de combustible (Fernández Alonso, 2016).

Se han desarrollado varios tipos de modelos de combustible, pero para este trabajo se ha seleccionado el de Rothermel (Rothermel, 1972) debido a que es el que se ha establecido en el Plan de Silvicultura Preventiva de la Comunidad Valenciana en 1996. Una vez se ha obtenido la información sobre

combustibles se va a introducir en el simulador de incendios *Flammap*, por lo tanto, hay que seleccionar una cartografía que también sea aceptada por dicho software.

Tabla 1: Tablas de la caracterización de los modelos de combustible según Rothermel en 1972 (*Conselleria de Medi Ambient, 1996*).

Grupo	Modelo	Descripción
Pastos	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 por el pasto seco.
	2	Pastizal con presencia de matorral o arbolado claro que cubren 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.
Matorral	4	Matorral o arbolado joven muy denso de unos 2 m de altura. Continuidad horizontal y vertical del combustible. Abundancia de combustible leñoso muerto (ramas) sobre plantas vivas. El fuego se propaga rápidamente sobre las copas del matorral con gran intensidad y llamas grandes. La humedad del combustible vivo tiene gran influencia en el comportamiento del fuego.
	5	Matorral denso, pero bajo, de altura no superior a 0,6 m. Cargas ligeras de hojarasca del mismo matorral, que contribuye a propagar el fuego con vientos flojos. Fuegos de intensidad moderada.
	6	Matorral más viejo que en el modelo 5, con alturas entre 0,6 y 1,2 m. Los combustibles vivos son más escasos y dispersos. El conjunto es más inflamable que el modelo 5. El fuego se propaga a través del matorral con vientos de moderados a fuertes.
	7	Matorral inflamable de 0,6 a 2,0 m de altura, que propaga el fuego bajo el arbolado. El incendio se desarrolla con contenidos más altos en humedad del combustible muerto que en los otros modelos debido a la naturaleza más inflamable de los combustibles vivos.
Hojarasca bajo arbolado	8	Hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas. La hojarasca forma una capa compacta al estar formada por acículas cortas (5 cm o menos) o por hojas planas no muy grandes. Los fuegos son de poca intensidad, con llamas cortas y velocidades de avance bajas. Solamente en condiciones meteorológicas desfavorables (altas temperaturas, bajas humedades relativas y vientos fuertes) este modelo puede volverse peligroso.
	9	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 <i>Pinus pinaster</i> , o por hojas grandes y rizadas como las de <i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Castanea sativa</i> , etc. Los fuegos son más rápidos y con llamas más largas que en el modelo 8.

Restos de corta y operaciones silvícolas	11	Restos ligeros recientes, de tratamientos silvícolas o de aprovechamientos, formando una capa poco compacta de escasa altura (alrededor de 30 cm). La hojarasca y el matorral presentes ayudarán a la propagación del fuego. Los incendios tendrán intensidades altas y pueden generar pavesas.
	12	Restos 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. No hay combustibles vivos que influyan en el fuego. Los incendios tendrán intensidades altas y pueden generar pavesas.

4. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo principal del trabajo ha sido modelizar el comportamiento del fuego en un incendio.

Para cumplir con el objetivo principal, ha sido imprescindible generar cartografía de los modelos de combustible a partir de datos obtenidos del proyecto LiDAR – PNOA y su posterior procesado con el software *Fusion*. También se ha hecho uso de un mapa de combustible realizado a partir de fotointerpretación para compararlo con el obtenido a través del procesado. Todo ello con la finalidad de analizar los datos que son de interés, acerca del dosel vegetal, como son la cobertura, la fracción de cabida cubierta (FCC), la densidad aparente de copas, el coeficiente de variancia y las alturas de los percentiles.

Una vez obtenida la información acerca del dosel vegetal y el combustible, se han introducido todas las variables en el simulador de incendios *Flammap* con el fin de observar el comportamiento del fuego en el barranco de Tagarina.

5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se ha seleccionado el barranco de la Tagarina de Sella como caso de estudio debido a la peligrosidad que presenta dicho espacio como consecuencia de sus condiciones precarias, entre ellas, el abandono de tierras y el éxodo rural.



Figura 2: Localización geográfica del barranco caso de estudio. Fuente: PNOA, IGN. Elaboración propia.

El municipio de Sella se encuentra en la comarca de la Marina Baja, dentro de la provincia de Alicante, en la que tan solo viven 585 habitantes según el INE-2018. Es una zona con cambios bruscos de pendiente, ya que la parte más baja del barranco se encuentra entorno a los 430 metros y la más alta cerca de los 1500 metros, debido a la orografía accidentada de la cadena montañosa del norte de Alicante. Las diferencias de altitud hacen que el relieve sea un factor principal a la hora de explicar la gran diversidad climática, ya que es una zona de escasa precipitación y elevadas temperaturas, que van a influir en la humedad del combustible. La vegetación natural corresponde a un tipo de bosque esclerófilo en el que la especie dominante es la carrasca y la coscoja que se encuentran en un estado de degradación. Las numerosas talas e incendios han dejado un paisaje de bosques residuales y un número indeterminado de árboles aislados en campos de cultivo y pinares. También se observa un estrato matorral abundante compuesto básicamente por romero, brezo y aliagas (Piqueras Haba, 2012).

La problemática real a la que se enfrenta esta zona es la presencia de altos niveles de combustible debido a la vegetación frondosa y a la orografía complicada del barranco, con cambios bruscos de pendiente. Por otra parte, al problema de las numerosas viviendas que se encuentran en riesgo extremo, se le suma la dificultad de que tan solo existe un vial de entrada y otro de salida. Por un lado, la creación de un nuevo cortafuegos supondría un elevado coste, y, por otro lado, la zona de Tagarina se encuentra bajo dos figuras de protección: Lugar de interés comunitario (LIC) y Zona de especial protección para las aves (ZEPA).

Se ha recreado el incendio sucedido en 1995, en el cual había unas condiciones similares a las de la actualidad, en lo que se refiere a cantidad de combustible. Además del gran espesor de estrato de vegetación, existen numerosos campos de cultivos abandonados y no se han llevado a cabo las medidas correctoras de limpieza para la prevención de un incendio.

El incendio recreado, fue intencionado y se detectó entorno a las 04:00h de la madrugada del día 13 de julio de 1995, dándose por controlado el día 14 de julio a las 20:00 horas. Se inició junto a la carretera que atraviesa el barranco, en una de las zonas más bajas y produjo la quema de un total de 502 hectáreas. Según el análisis histórico sobre incendios, las condiciones meteorológicas sobre las que se desarrolló el incendio eran desfavorables, ya que se trataba de un periodo estival y de sequía, además que el índice de riesgo del ICONA señalaba prealerta, lo que a priori indica una situación desfavorable para la extinción del fuego. Como se ha observado, el terreno tiene acusadas pendientes, y había una gran cantidad de combustible, con una vegetación frondosa, lo que provocó que el fuego se propagara por la superficie y por las copas de los árboles. En consecuencia, la intensidad del fuego fue bastante alta (Generalitat Valenciana, 2007).

6. MATERIAL EMPLEADO

6.1. Softwares utilizados

ArcGIS: es un Sistema de Información Geográfica (SIG). Éste nos ha permitido la implementación de las herramientas “*LasTools*”, y de la aplicación del formato *Bat* para el procesado de los datos. Además, nos ha permitido el manejo de los datos en formato ráster y vectorial.

ArcCatalog: Extensión del software ArcGis que nos ha permitido crear un *LASDataset* (se trata de un formato binario estándar para almacenar datos LiDAR, permitiendo examinar los archivos *LAS* y proporcionando estadísticas detalladas sobre la nube de puntos (ESRI, 2019) y calcular las estadísticas de la nube de puntos LiDAR.

Fusion: Es un software que se ha utilizado para procesar los datos LiDAR por variables junto con la consola de Windows. Es de gran utilidad para aplicaciones forestales.

LasTools: Paquete de herramientas incorporado en *ArcGis*. El paquete ha permitido el filtrado de la nube de puntos y posterior clasificación antes de usar los datos en *Fusion*.

Flammapp: Simulador de incendios forestales libre, que lleva implementado los algoritmos relacionados con el fuego y su evolución. Este simulador lleva incorporado como novedad en su última versión el software *Farsite*. Se trata de una herramienta interesante, ya que permite simular un incendio en

tiempo real, de forma que se podría utilizar para prever de manera aproximada los puntos más críticos o por el contrario las zonas donde la extinción sería menos arriesgada. Debe construirse en un sistema de información geográfica a partir de formato ráster, concretamente *ASCII*.

6.2. Datos de partida

Para la generación del mapa de combustible y el resto de las variables que se han aplicado en *Flammap* se ha partido de los datos *LAZ* descargados del CNIG pertenecientes al proyecto LiDAR – PNOA, concretamente a la segunda cobertura, iniciada en el año 2015 en el territorio nacional correspondiente con la zona del Barranco de Tagarina. La nube de puntos LiDAR tiene una densidad de puntos de 0’5/m² o mayor, y con un error de Z de 0’2 metros, todos los datos clasificados automáticamente por el Instituto Geográfico Nacional (CNIG, 2019).

En lo que se refiere a el mapa realizado a partir de fotointerpretación, se ha hecho uso de la ortofoto de máxima actualidad (2017), también proporcionada por el CNIG. Se ha elaborado una capa de usos forestales a partir de la identificación de los diferentes tipos de vegetación en la ortofoto y posterior clasificación según los valores dictados en la leyenda de vegetación del Plan de Selvicultura Preventiva (tabla 2).

Tabla 2: Tabla correspondiente con los valores de la leyenda de vegetación según el Plan de Selvicultura Preventiva de incendios en los sistemas forestales de la Comunidad Valenciana (*Conselleria de Medi Ambient, 1996*)

Código	Descripción
M00	Zona incendiada año 1994
M0	Zona incendiada año 1993
M3	Zona incendiada periodo 1989-1992
M1	Matorral F.C.C < 30%
M2	Matorral F.C.C > 30%
1	Replacación forestal con altura < 2 m
2	Replacación forestal con altura > 2 m
3A	Coníferas F.C.C < 25 %
3B	Coníferas F.C.C 25 % < F.C.C. < 50 %
3C	Coníferas F.C.C. 50 % < F.C.C. < 75 %
3D	Coníferas F.C.C > 75 %
3FA	Fronosas F.C.C. < 25%
3FB	Fronosas 25 % < F.C.C. < 50 %
3FC	Fronosas 50 % < F.C.C. < 75 %
3FD	Fronosas F.C.C. > 75 %
5	Improductivo

6	Improductivo por aguas
C	Cultivos agrícolas
T	Cortafuegos

7. METODOLOGÍA

7.1. Trabajo de campo

Se han realizado varias salidas de campo para documentar de forma gráfica las afecciones al territorio, principalmente el estado de la vegetación en el barranco de Tagarina, de las vías de comunicación y las viviendas.

7.2. Trabajo de gabinete

A continuación, se muestra un esquema general (figura 3) con los pasos que van a seguirse para realizar la cartografía de modelos de combustible.

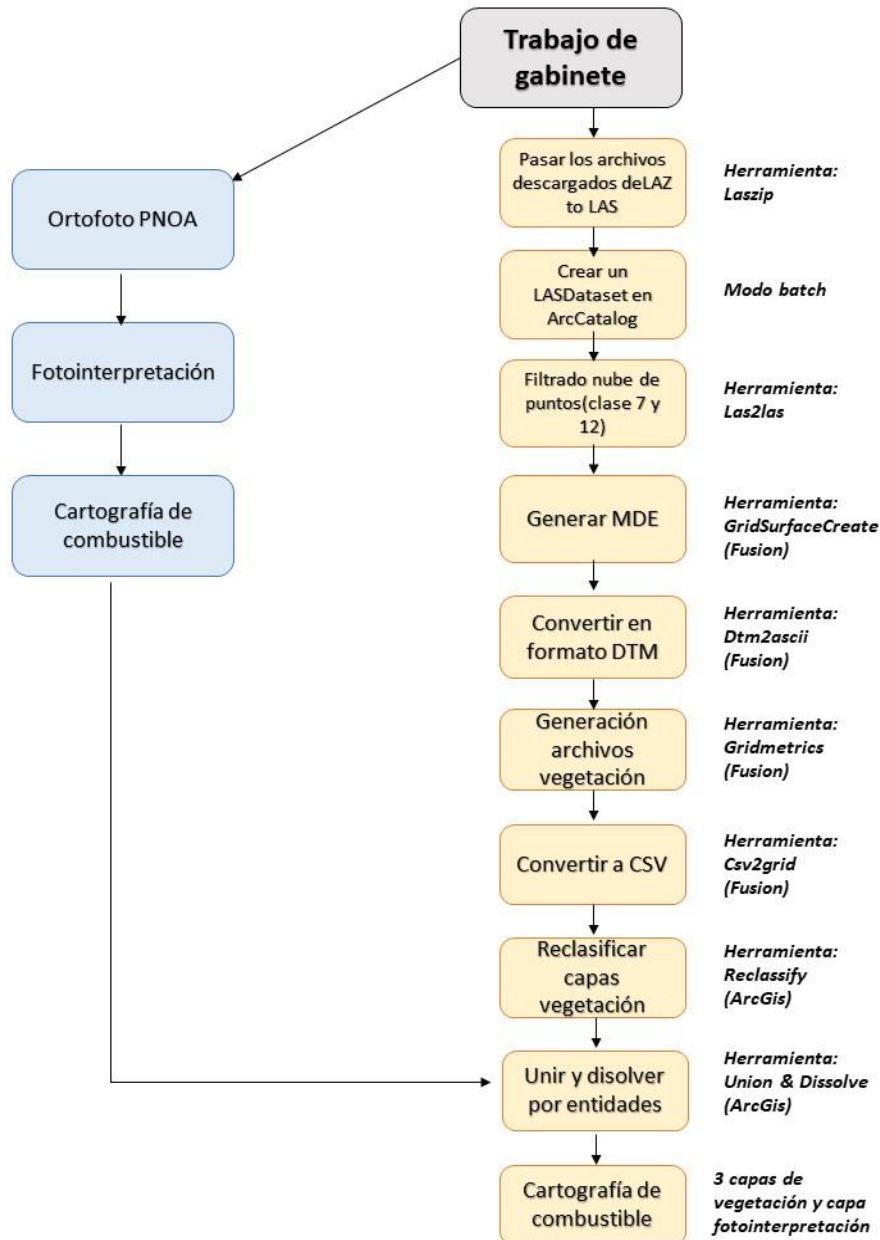


Figura 3: Diagrama general de los métodos utilizados para extraer la cartografía de combustibles.

7.2.1 Fotointerpretación

En primer lugar, se han cartografiado los modelos de combustible presentes en el barranco a partir de la fotointerpretación. Este mapa se ha realizado siguiendo la clasificación de la vegetación y del combustible del Plan de Selvicultura Preventiva de Incendios en los Sistemas forestales de la Comunidad Valenciana que se observa en la tabla 2 (Conselleria de Medi Ambient, 1996).

Como se aprecia en la figura 4, predominan en el barranco las coníferas, ocupando gran parte de ellas las que contienen una fracción de cabida cubierta superior al 75% en la zona de umbría. En la zona de solana predominan los matorrales, aunque también hay presencia de coníferas, pero con una fracción de cabida cubierta inferior al 25%. Las zonas de cultivo se observan a lo largo de todo el barranco, coincidiendo con las zonas más bajas del mismo.

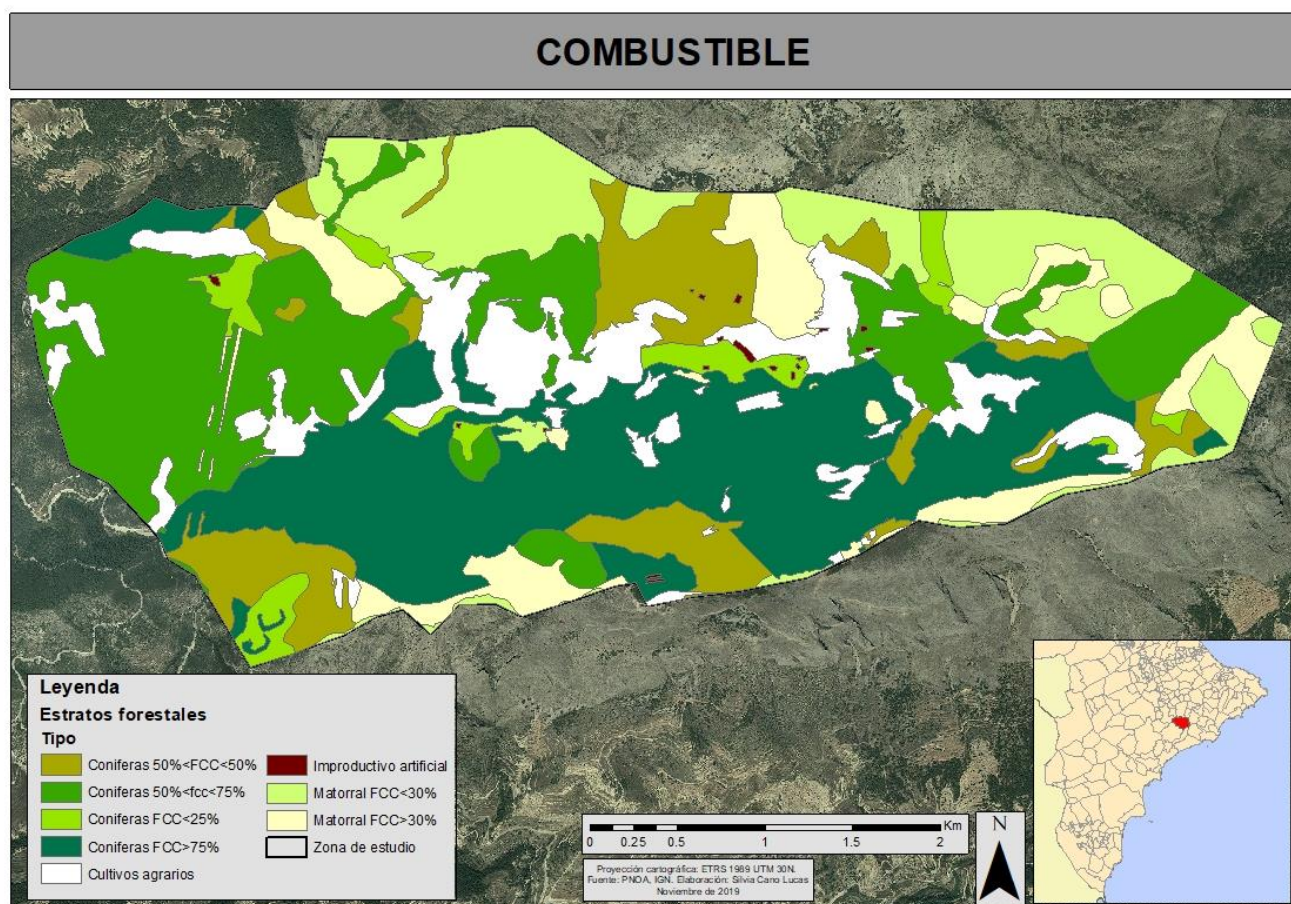


Figura 4: Mapa de modelos de combustible presentes en Tagarina realizado mediante fotointerpretación.

7.2.2 Procesado sobre los datos LiDAR - PNOA

En segundo lugar, se ha hecho uso de datos LiDAR – PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) con el objetivo de mejorar los resultados del primer mapa (figura 4) realizado a partir de la fotointerpretación y poder así aportar fiabilidad a los datos.

Para la realización de este análisis, ha sido imprescindible la descarga y posterior procesado de los datos LiDAR en formato *LAZ* proporcionados de manera pública por el CNIG del programa PNOA.

Los archivos descargados son archivos de tipo *LAZ*, pero, para poder realizar un análisis y trabajar con ellos se deben descomprimir y convertir a fichero *LAS*. De esta manera se ha tenido que incorporar la herramienta *laszip.dll* al software *Fusion*, que se trata de una librería de datos LiDAR y en concreto se ha trabajado con la herramienta *laszip*.

Por otro lado, el barranco de la Tagarina abarca 8 parcelas que corresponden con 8 cuadrículas diferentes de información LiDAR, cada una de ellas abarca una superficie de 2x2 kilómetros, por tanto, se ha realizado un recorte para poder trabajar de una manera más rápida debido a la reducción del peso

de los datos. Previamente a este paso se ha creado un *LASDataset*, que se trata de un formato binario estándar para almacenar datos LiDAR, permitiendo examinar los archivos LAS y proporcionando estadísticas detalladas sobre la nube de puntos (ESRI, 2019), donde se han incorporado los diferentes ficheros *LAS* y se han calculado las estadísticas, para conocer datos de interés como la cantidad de pulsos emitidos por el sensor o el tipo de clasificación que se le ha otorgado a cada punto.

Las herramientas de *LASTools* se pueden aplicar sobre varios archivos, por esta razón, existe la posibilidad de trabajar en modo *batch*. Debido a la elevada cantidad de información que contiene la nube de puntos LiDAR se han programado ficheros *batch* para la ejecución de ordenes de manera secuencial, para poder optimizar las tareas en cada procesado (figura 5). Estos archivos permiten una automatización de las tareas de manera muy sencilla, pero, siguiendo la misma estructura para que el software que va a ejecutarlo, en este caso *ArcGis* pueda efectuar las funciones a partir de líneas de código almacenadas en ficheros de texto bajo la extensión *bat*.

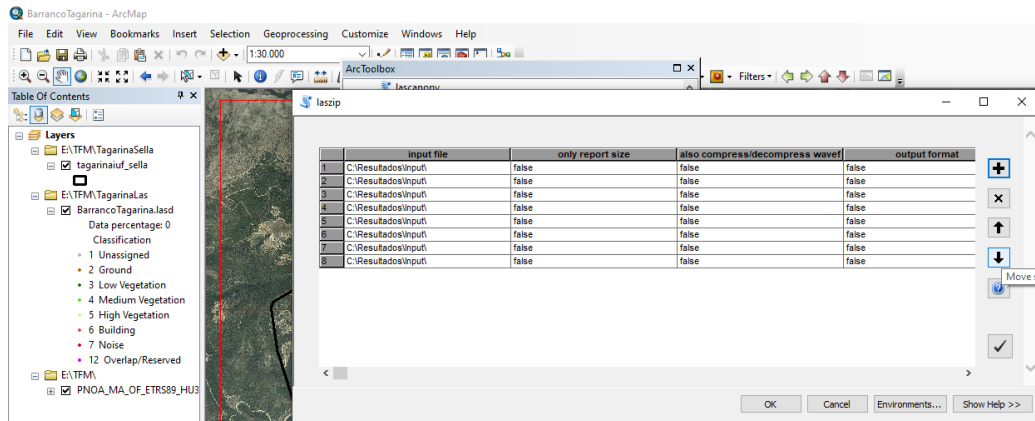


Figura 5: Ejemplo de código utilizado en batch en ArcGis

Como se observa en la tabla 3, la nube de puntos se clasifica en diferentes variables predeterminadas en la toma de datos. Se ha procedido a eliminar el ruido de la nube de puntos, aplicando la herramienta *las2las(filter)* del bloque de *LASTools* en modo *batch*, mediante la eliminación de los puntos clasificados como 7 en las estadísticas.

Tabla 3: Clases predefinidas de los datos LiDAR – PNOA para la nube de puntos.

Clase	1	2	3	4	5	6	7	12
	Sin asignar	Suelo	Vegetación baja	Vegetación media	Vegetación alta	Edificios	Ruido	Solape

El segundo proceso de filtrado que se ha aplicado es el proceso de eliminación de la clase 12 que corresponde con los solapes en las estadísticas.

Para el procesado de los datos LiDAR – PNOA, una vez han sido descomprimidos y filtrados, se ha hecho uso del programa *FUSION*, que se trata de un software de descarga gratuita que fue desarrollado por Robert J. McGaughey del servicio forestal del departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) que trabaja especialmente con datos LiDAR en ambiente forestal. Para la ejecución de las funciones dentro del software *FUSION* se ha utilizado la consola de comandos de Windows.

Se ha creado un sistema de carpetas para una correcta organización con el fin de tener todos los archivos *LAS* en un mismo directorio, por ello se ha creado un archivo *txt* con todas las rutas de los archivos LiDAR.

A continuación, se ha generado un MDE, que se utilizará para normalizar la nube de puntos a partir de los puntos clasificados como suelo, es decir en las estadísticas aquellos puntos clasificados como tipo 2. Para esto se ha utilizado la función *GridSurfaceCreate* con el siguiente script:

(*GridSurfaceCreate /class:2 C:\TFMSILVIA\MDE\MDE.dtm 5 m m 1 0 0 0 C:\TFMSILVIA\LAZ\lista.txt*),

Esta función crea un modelo de superficie cuadrulado utilizando la información de los puntos. De forma predeterminada, la función *GridSurfaceCreate* calcula la elevación de cada celda de la cuadrícula utilizando la elevación promedio de todos los puntos dentro de la celda. (McGaughey, 2018). El archivo de salida es un archivo *dtm* que, como se observa en la ruta, se le ha establecido como resolución espacial de los píxeles, 5 metros, y la configuración del sistema de coordenadas se ha dejado por defecto en 1 0 0 0, que corresponde con ETRS 1989 UTM 30N.

Una vez generado el MDE en formato *dtm*, primera capa extraída de los datos LiDAR, se ha utilizado la función *Dtm2ascii* con la siguiente expresión:

(*Dtm2ascii C:\TFMSILVIA\MDE\MDE.dtm C:\TFMSILVIA\MDE\MDE.asc*)

Este *script* se aplica para poder convertir el formato de *dtm* a *ascii* y poder visualizarlo en un SIG ya que el formato *dtm* no es fácil de gestionar con los softwares relacionados con los Sistemas de Información Geográfica y el formato *ascii* sí.

Una vez generado el MDE y convertido a formato *ascii*, se ha procedido a calcular las estadísticas de esta malla de datos LiDAR. Se necesitan tres tipos diferentes de alturas de la vegetación con el motivo de extraer estadísticas que nos permitan hacer un cálculo del combustible, como se observa en la tabla 4:

Tabla 4: Parámetros utilizados para la clasificación de la vegetación. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de vegetación	Altura de la vegetación	Expresión de FUSION
Estrato del Arbolado	Entre 2 y 30 metros de altura	<i>Gridmetrics /minht:2 /outlier:-1,30 C:\TFMSILVIA\MDE\MDE.dtm 2 5 C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_2a30.csv C:\TFMSILVIA\LAZ\lista.txt</i>
Estrato del Matorral	Entre 0'5 y 2 metros de altura	<i>Gridmetrics /minht:0.5 /outlier:-1,2 C:\TFMSILVIA\MDE\MDE.dtm 0.5 5 C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_05a2.csv C:\TFMSILVIA\LAZ\lista.txt</i>
Estrato arbóreo y del matorral	Entre 0'5 y 30 metros de altura	<i>Gridmetrics /minht:0.5 /outlier:-1,30 C:\TFMSILVIA\MDE\MDE.dtm 0.5 5 C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_05a30.csv C:\TFMSILVIA\LAZ\lista.txt</i>

La función utilizada para extraer los estadísticos de vegetación ha sido *Gridmetrics*. Se han extraído 3 estadísticas diferentes, una para cada tipo de estrato: una para el estrato del arbolado, otra para el estrato del matorral y otra que combina ambas. Esta función calcula un conjunto único de estadísticas para todo el conjunto de datos, utilizando valores de elevación e intensidad en la misma función. Se utiliza para aplicar los modelos de combustible desarrollados para predecir las características del dosel combustible (McGaughey, 2018). Para comprender las expresiones de la tabla 4, debemos saber que el parámetro *minht* define a partir de que altura tiene en cuenta los puntos de la malla de puntos LiDAR para la estadística. Por otro lado, el parámetro *outlier* indica sobre qué puntos se trabaja, es decir, entre qué alturas oscila la vegetación, en este caso en metros. El valor 5 indica la resolución espacial que, en el caso de estas estadísticas, se ha indicado que el tamaño de píxel de salida fuese de 5 metros. El resultado de aplicar estas expresiones es la generación de 2 archivos con las estadísticas para cada *csv*, el primer archivo corresponde con la elevación y el segundo hace referencia a la intensidad, ya que los

datos LiDAR no solo toman información de x, z, e y, si no también de la intensidad de los retornos. Los primeros 50 centímetros de vegetación no son fiables en la zona de estudio debido a la gran cantidad de estrato vegetal de diferente tipología, y por ello se han descartado a la hora de realizar el análisis. Además de que los puntos LiDAR poseen errores altimétricos medios de 0,2 metros, por lo que puede darse el caso de que haya retornos mal clasificados, pudiendo producirse errores en los análisis posteriores, al confundirse estos puntos con estratos de matorral, cuando en realidad representan la superficie del terreno. Por otro lado, se ha establecido un máximo de 30 metros de altura del arbolado, porque en el barranco no existe arbolado superior a esta altura, en caso de encontrarnos en otras condiciones se aplicaría otro nivel de altura acorde con la situación.

El resultado son 3 archivos *csv* que contienen la información sobre las estadísticas de la nube de puntos para elaborar los mapas de modelización del combustible. Los archivos *csv* contienen información sobre las estadísticas y los percentiles que se utilizarán para caracterizar el mapa de combustible. La información que resulta relevante para la elaboración del mapa es la altura media del matorral, la altura media de toda la vegetación y la fracción de cabida cubierta (FCC) del matorral, que hace referencia al grado de recubrimiento del suelo para la proyección vertical vegetal de las copas del arbolado (expresada en porcentaje).

Para convertir los formatos a ráster y poder manejarlos con mayor facilidad se han utilizado las siguientes expresiones:

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_05a30_all_returns_elevation_stats.csv 8 C:\TFMSILVIA\RASTER\alturamedia_todo.asc
```

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_05a2_all_returns_elevation_stats.csv 49 C:\TFMSILVIA\RASTER\FCC_.asc
```

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_05a2_all_returns_elevation_stats.csv 8 C:\TFMSILVIA\RASTER\alturamedia_matorral.asc
```

El resultado de la aplicación de estas funciones son los siguientes mapas:

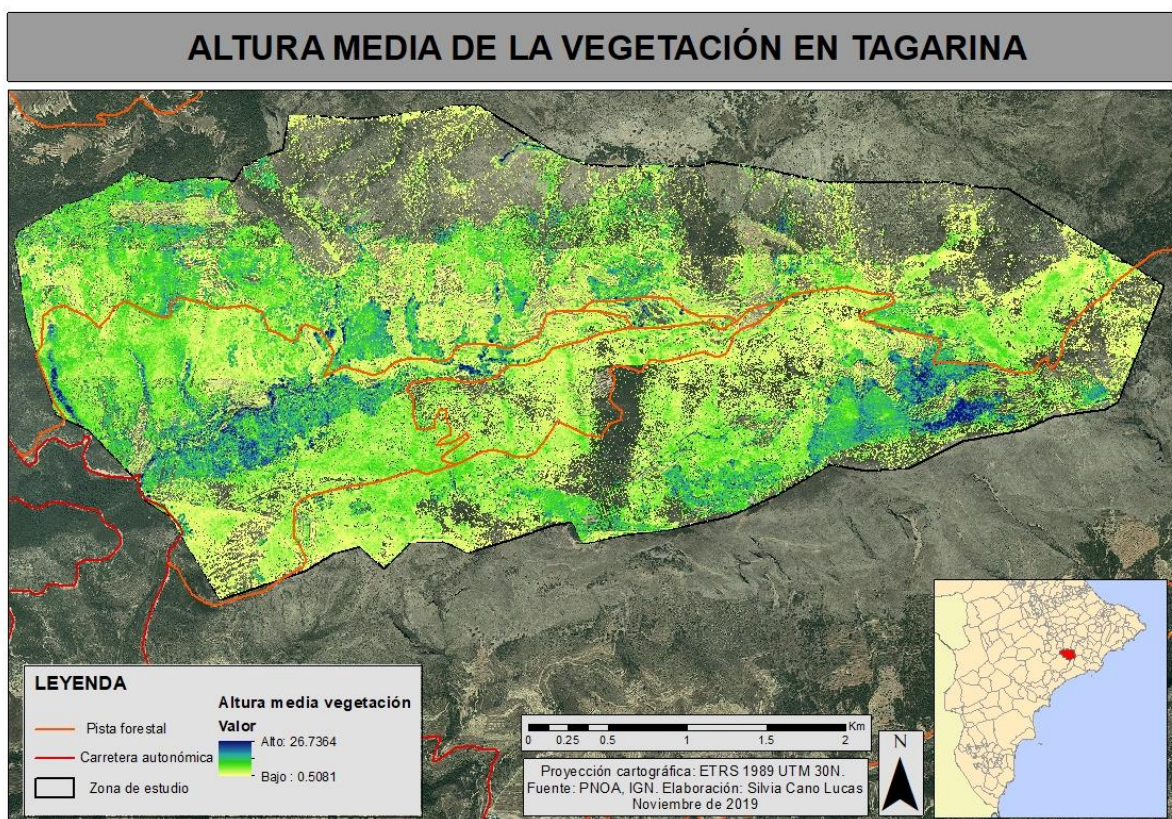


Figura 6: Altura media de la vegetación. En tonos amarillentos las zonas con vegetación más bajas y en tonos azulados las zonas con mayor altura.

FRACCIÓN DE CABIDA CUBIERTA DEL MATORRAL EN TAGARINA

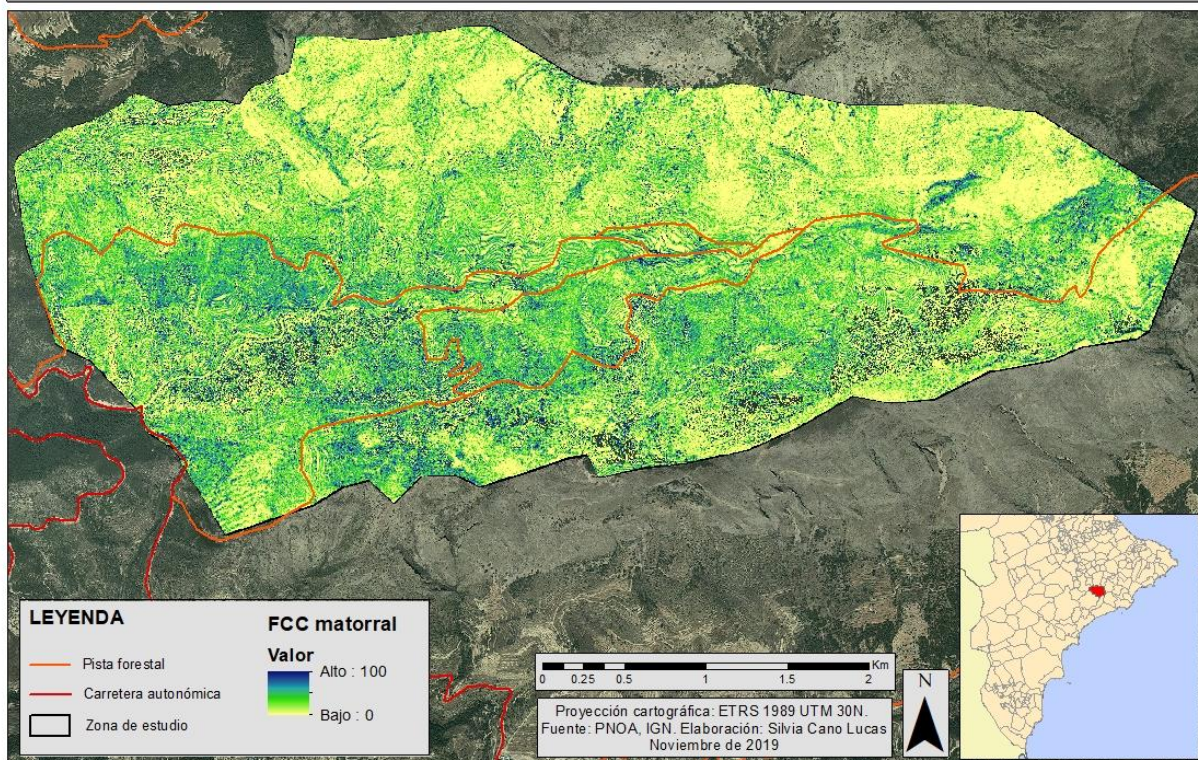


Figura 7: Fracción de cabida cubierta (FCC) del matorral, los valores oscilan entre 0 y 100. Los tonos más azulados hacen referencia a una fracción de cabida cubierta mayor, por el contrario, los tonos amarillos a una fracción de cabida cubierta baja.

ALTURA MEDIA DEL MATORRAL EN TAGARINA

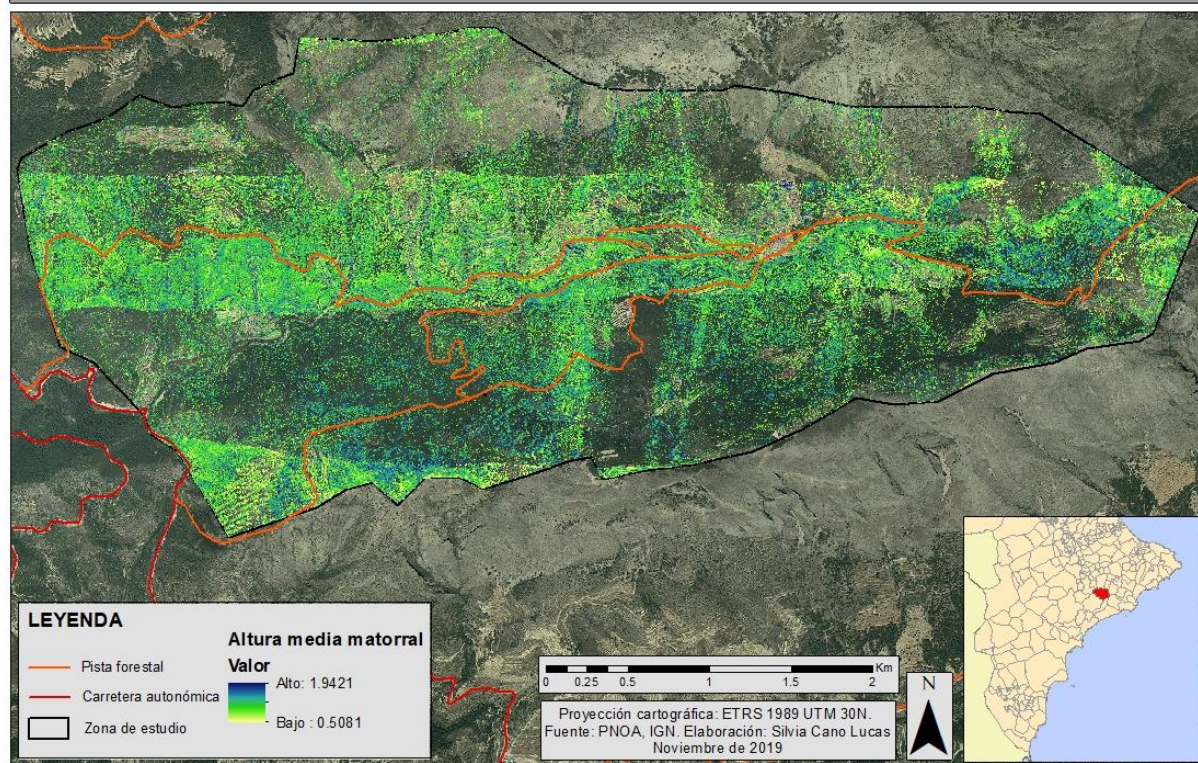


Figura 8: Altura media del matorral en el barranco de Tagarina. En tonos más azulados los matorrales con mayor altura.

7.2.3 Criterios de asignación de los modelos de combustible del barranco de la Tagarina

Los criterios de asignación para los modelos de combustible se asientan a partir de los 3 ráster anteriores, ya que son los 3 parámetros estructurales correspondientes al procesado de estratos por altura y cobertura.

El siguiente paso ha sido reclasificar las 3 capas ráster como se observa en la tabla 5. Después de su correcta reclasificación para posterior análisis se han convertido a formato vectorial.

Tabla 5: Valores reclasificados de los ráster haciendo uso de *ArcGis*.

Ráster	Valor original	Valor reclasificado
FCC matorral	Sin datos	0
	< 30 %	1
	Entre 30 y 60 %	2
	> 60 %	3
H media vegetación	Sin datos	0
	H < 1 metro	1
	H entre 1 y 2 metros	2
	H entre 2 y 4 metros	3
	H > 4 metros	4
H media matorral	Sin datos	0
	H < 1 metro	1
	H entre 1 y 2 metros	2

El resultado de esta reclasificación es una tabla de atributos mucho más simple y manejable, en la que ahora se tienen tan solo 4 valores diferentes para obtener los 8 modelos de combustible presentes en Tagarina.

Una vez se ha realizado esta clasificación, se ha procedido a la unión de las 3 capas resultantes correspondientes a la FCC del matorral, la altura media del matorral y la altura media de la vegetación junto con la capa inicial de fotointerpretación mediante el software *ArcGis* a través de la herramienta de procesamiento de análisis espacial *Union*. Posteriormente, se ha aplicado a la capa resultante, la herramienta *dissolve*, para agrupar los diferentes puntos de la nube por categorías, y trabajar de una manera más sencilla.

7.2.4 Aplicación de los modelos según el sistema Prometheus

Rothermel estableció 13 modelos diferentes de combustible que se correspondían con situaciones ocurridas en los Estados Unidos, pero para el caso de estudio, se ha trasladado para una mayor simplificación a un entorno europeo basándose en el proyecto de modelos de combustible *Prometheus* ya que se adapta más a las características típicas mediterráneas, siendo su mayor criterio el tipo y altura de la vegetación, dividida en 3 grandes grupos: pasto, matorral y arbolado (Ramírez Cisneros, y otros, 2013) (figura 9).

Se le ha dado valor 0 (modelo 0 de combustible) a aquellos retornos que daban información sobre edificaciones, zonas improductivas o áreas urbanas en la asignación de la nube de puntos. Se le ha asignado modelo 2 a las zonas agrícolas, que predominan en el centro del barranco. Para la clasificación del arbolado, se ha partido de la altura de toda la vegetación, siguiendo el siguiente criterio: cuando el estrato de la vegetación era inferior a los 4 metros se le ha asignado el modelo 4. Por otro lado, cuando la altura de la vegetación supera los 4 metros, se ha recurrido a la capa de Fracción de cabida cubierta (FCC) del matorral, siguiendo las siguientes pautas: cuando la FCC ha sido superior a 30%, se le ha asignado un modelo 7 y cuando la FCC ha estado por debajo del 30% se le ha otorgado un modelo 8. Por otra parte, para la clasificación de los modelos de combustible basándonos en la altura del matorral, también se ha

recurrido a la altura media de toda la vegetación, cuando esta ha sido inferior a un metro se le ha otorgado el valor de modelo 5, cuando la altura ha estado entre 1 y 2 metros un modelo 6 (figura 10).

También se observa como pertenecientes al pastizal, el modelo 1 y modelo 2, que como se examinará en el mapa de combustible (figura 11), no existen dichos modelos debido a que en la zona del barranco de Tagarina no hay pastizales.

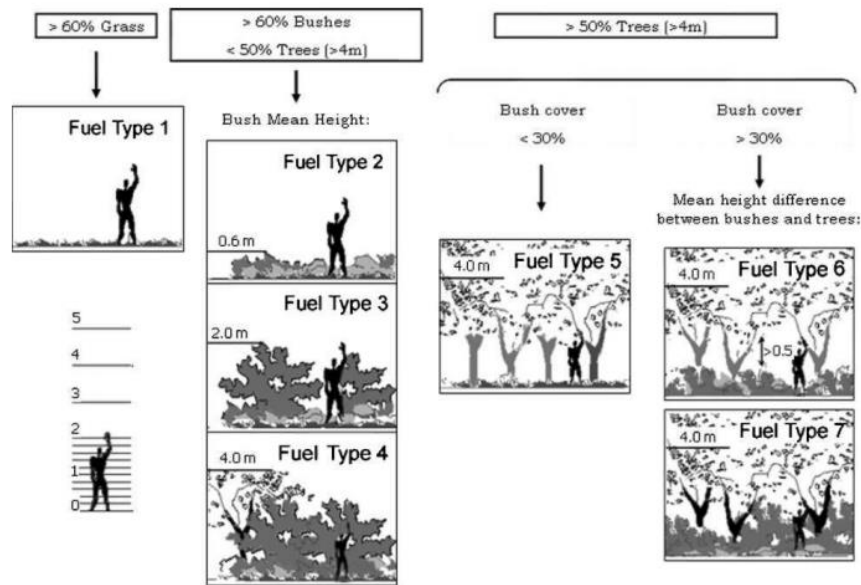


Figura 9: Modelo *Prometheus* utilizado para la clasificación de combustible. (Arroyo, Pascual, & Manzarena, 2008)

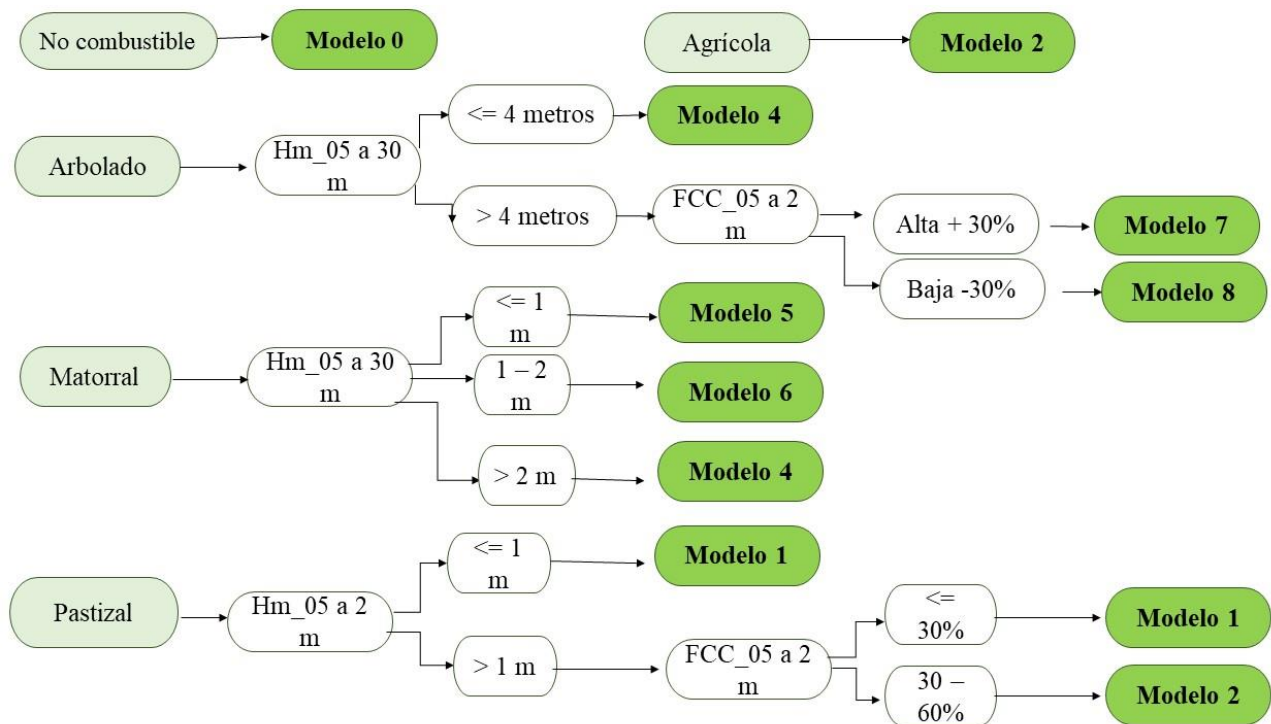


Figura 10: Metodología utilizada para la elaboración del mapa de combustible. Fuente: Elaboración propia.

COMBUSTIBLE A PARTIR DE DATOS LIDAR

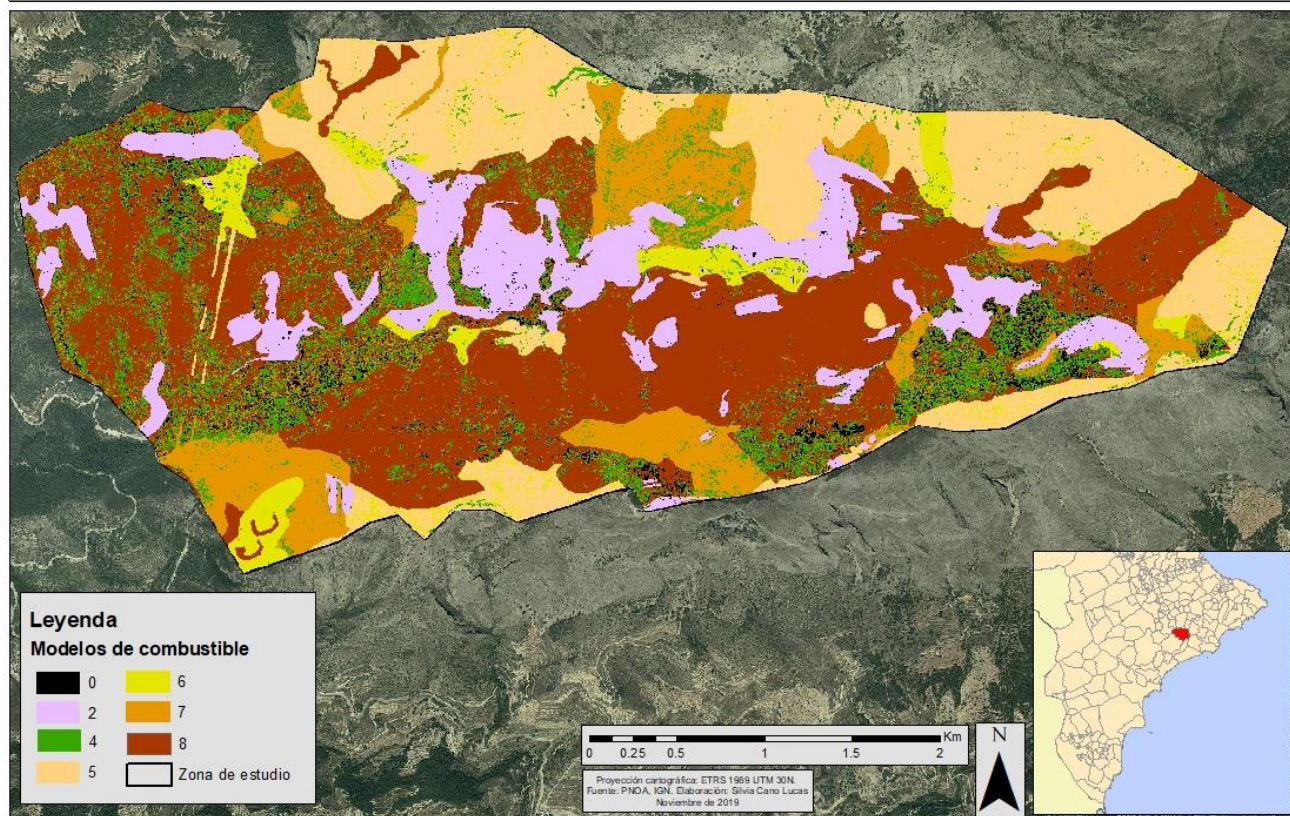


Figura 11: Mapa final de combustibles presentes en el barranco de Tagarina mediante la metodología de combinación entre fotointerpretación y datos LiDAR.

Se han seleccionado los colores en tonos diferentes para una mayor diferenciación ya que, al tratarse de puntos, en alguna de las zonas no se mostraba bien. Se observa en la figura 11 el predominio de 3 modelos sobre los demás, el modelo 2, el 5 y el 8. El modelo 8 se trata de un dosel vegetal formado por hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas.

Destacan los cultivos (modelo 2), zonas que están dedicadas a olivo, almendra y cereal. Son terrenos que se encuentran en zonas de pendiente, por tanto, siguen un patrón de bancales o terrazas. Surge una mayor problemática en estas zonas debido a que muchos campos de cultivo están abandonados, por consiguiente, el combustible está seco, con exceso de hojarasca y ramas caídas por la vegetación leñosa, provocando que el fuego se propague rápidamente en estas zonas abandonadas.

El modelo 5 se encuentra sobre todo en zonas altas del barranco de Tagarina, que se trata de matorral denso, pero bajo, es decir su altura no supera los 0'6 metros. Hay cargas ligeras de hojarasca del mismo matorral, que contribuye a propagar el fuego con vientos flojos, produciendo fuegos de intensidad moderada.

En lo que refiere al resto de modelos, observamos que apenas hay zonas 0, es decir zonas no combustibles. Destaca el modelo 5 de matorral frente a los modelos 6 y 7.

8. SIMULADOR DE INCENDIOS FLAMMAP

Se trata de un software que se basa principalmente en el análisis de incendios forestales. Puede simular las características del comportamiento del fuego, como son la longitud de la llama, la intensidad o la velocidad de propagación del fuego. Es un programa diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos – U.S Servicios Forestales. Hoy en día, al software *Flammap* se le ha incorporado el software *Farsite*, que se caracteriza porque puede calcular el comportamiento y crecimiento de los incendios forestales, basándose en el tipo de combustible de la zona, la humedad del combustible y las

condiciones climáticas. Dentro del programa, el comportamiento del fuego se calcula para cada píxel dentro del archivo de paisaje de manera independiente (U.S, 2019).

8.1 Parámetros para crear el archivo Landscape File (LCP)

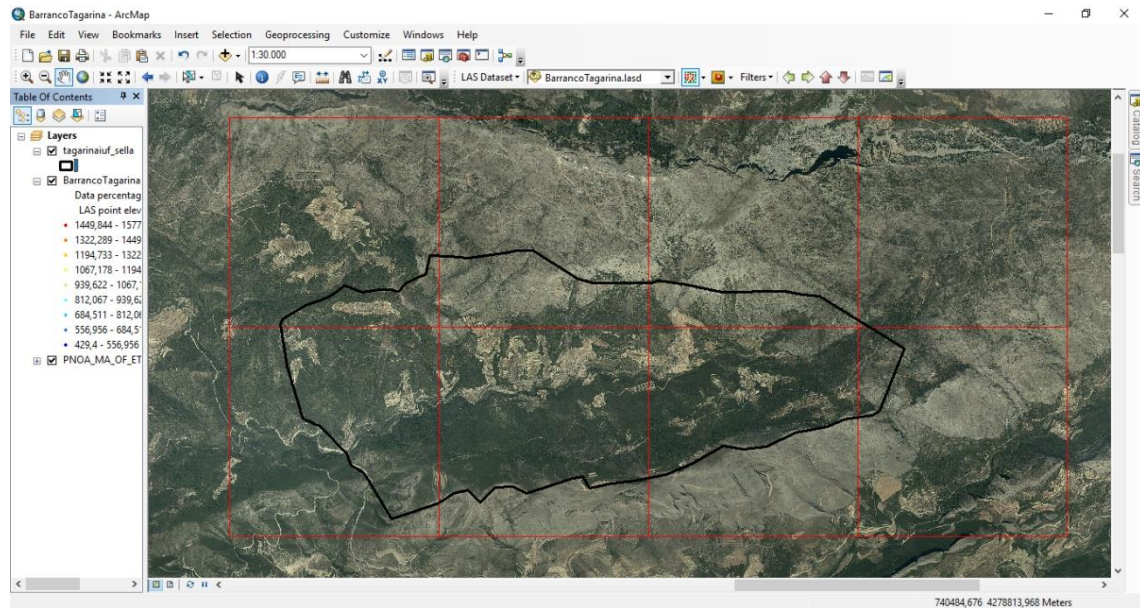


Figura 12: Zona de estudio sobre la que se va a trabajar en el Simulador Flammap

Para la creación del archivo de paisaje (*LCP*), que se trata del archivo específico con el que trabaja el software *Flammap* y sobre el cual se va a realizar la simulación, se necesitan 8 variables diferentes: MDE, mapa de pendientes, mapa de orientación, cartografía sobre modelos de combustible, la fracción de cabida cubierta del arbolado, la altura media del arbolado, la altura base del arbolado y la densidad de copas. Se ha expandido la zona de estudio más allá del barranco, ya que este programa trabaja sobre cuadrículas ráster y no sobre un *shape* tan específico como es el barranco de la Tagarina, por tanto, se ha seleccionado como zona de estudio para el simulador la zona que abarcaban las 8 cuadrículas de datos LiDAR descargadas del CNIG (figura 12).

Haciendo uso de los archivos LiDAR – PNOA filtrados anteriormente, se van a extraer de nuevo una serie de variables a partir del software FUSION y la consola de comandos de Windows, concretamente los que pide el programa Flammap para la creación del archivo LCP (figura 13):

- MDE - Elevación
- Mapa de pendientes
- Mapa de orientaciones
- Modelos de combustible clasificados
- Fracción de cabida cubierta del arbolado
- Altura media del arbolado
- Altura de la base del arbolado
- Densidad de copas del arbolado

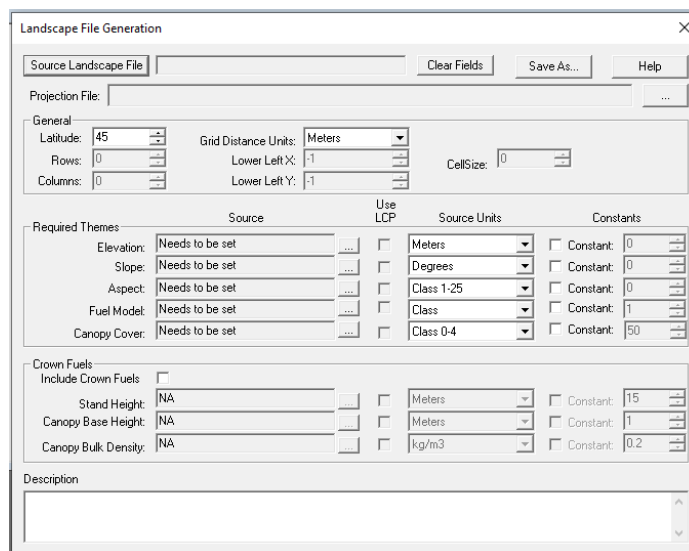


Figura 13: Creación del archivo de paisaje LCP en Flammap.

8.1.1 Parámetros topográficos a partir de datos LiDAR

Modelo digital de elevaciones (MDE): Se ha extraído a través de la función *Dtm2ascii* de FUSION con la siguiente expresión:

```
(Dtm2ascii C:\TFMSILVIA\MDE\MDE.dtm C:\TFMSILVIA\MDE\MDE.asc)
```

Es imprescindible para generar los siguientes dos parámetros:

Modelo digital de pendientes: La generación de un mapa de pendientes (en grados) es de gran importancia, dado el efecto directo sobre el cálculo de la velocidad de propagación del fuego, mediante la ecuación de Rothermel. Dicha ecuación está incorporada en el simulador de incendios Flammap. Es importante tener esta variable, ya que con un incremento de la velocidad de propagación e intensidad del fuego será más favorable pendiente arriba. Por otro lado, una disminución de la velocidad de propagación e intensidad del fuego se verán reflejadas cuando el fuego se encuentre desfavorecido de la pendiente, es decir, ladera abajo (Resano Toledo, 2018). (Ver anexo 4)

Modelo digital de orientaciones: La orientación define la exposición del relieve respecto al medio circundante. La orientación del terreno o laderas es importante a la hora de estudiar los procesos morfológicos, la existencia de un tipo de vegetación u otra, y en este caso para el simulador, la importancia de saber si una ladera se encuentra en zona de solana con orientación sur, es decir zonas con una incidencia de la radiación solar mayor, y por tanto con una menor cantidad de humedad en los combustibles, y por otro lado la zona de umbría con orientación norte, es decir con laderas con menor exposición a la radiación solar y una mayor cantidad de humedad en el combustible. (Ver anexo 3)

8.1.2 Parámetros relacionados con la vegetación extraídos a partir de datos LiDAR

Modelo de combustible: Se va a utilizar la cartografía generada a partir de los datos LiDAR.

Fracción de Cobertura Cubierta del arbolado (FCC): Hace referencia al grado de recubrimiento del suelo por la proyección en vertical de las copas del arbolado y es expresado en tanto por ciento. Esta variable es influyente en los simuladores, por que incide en la reducción de la velocidad del viento, concretamente por debajo del dosel de copas y en que la sombra generada por la vegetación afecta a los modelos de combustible (Resano Toledo, 2018). Se ha extraído esta variable a partir de la aplicación del siguiente script en FUSION a partir de la consola de comandos de Windows:

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_2a30_all_returns_elevation_stats.csv 49 C:\TFMSILVIA\RASTER\FCC_arbolado.asc.
```

Se ha indicado el número 49, porque es la columna que hace referencia a la fracción de cabida cubierta del arbolado en el archivo *csv* que se tomen los datos entre los 2 y 30 metros de altura. (Ver anexo 1)

Altura media del arbolado: Se utiliza para estimar la carga de combustible de las copas, que será utilizada en el simulador para calcular la velocidad de propagación de copas. La siguiente variable que se utiliza en el archivo *LCP* es la altura media del arbolado. Esta información se ha extraído también a partir del archivo *csv*, procesándolo en *FUSION* a partir de la consola de comandos de Windows con el siguiente código:

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_2a30_all_returns_elevation_stats.csv 8 C:\TFMSILVIA\RASTER\alturamediarbolado.asc.
```

El numero 8 hace referencia a la columna del archivo *csv*, también se le ha indicado que extraiga los datos de entre las alturas 2 y 30 metros. (Anexo 2)

Altura base del arbolado o copas: La altura de la base de copas se ha obtenido directamente, igual que el resto de las variables a partir de los datos LiDAR procesados en *FUSION*. El código utilizado esta vez ha sido:

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_2a30_all_returns_elevation_stats.csv 26 C:\TFMSILVIA\RASTER\P10_arbolado.asc.
```

Así se ha extraído el percentil bajo de alturas de los retornos del estrato arbolado. Se ha escogido el percentil 10 de las alturas, ya que este se corresponde con la altura donde los retornos del pulso láser que están por debajo de ese 10%.

Densidad aparente de copas (*Canopy Bulk Density*): Es la variable de la masa del estrato que determina la propagación del fuego de copas. Esto quiere decir, que, con una disminución de la espesura de las copas, se reduce la continuidad horizontal, y se disminuye de esta manera el potencial de ocurrencia de fuego en las mismas (Madrigal, Hernando, Guijarro, & J, 2014). Para calcular la densidad aparente de copas hay que aplicar la siguiente ecuación, que se ha adaptado a las condiciones europeas según (Andersen, McGaughey, & Reutebuch, 2005):

$$\text{Ln (Canopy bulk density): } - 4.3 + (3.2*CV) + (0.02*P10) + (0.13*P25) + (-0.12*P90) + (2.4*FCC)$$

Para resolver la anterior ecuación del logaritmo neperiano son necesarios el coeficiente de variancia del arbolado (CV) importante para saber si el barranco contiene áreas estratificadas o no, el percentil 10 del arbolado (P10), el percentil 25 del arbolado (P25), el percentil 90 del arbolado (P90) y la fracción de cabida cubierta del arbolado (FCC). Para extraer las variables que se han aplicado en la ecuación se han aplicado los siguientes scripts para el software *FUSION* en la consola de comandos de Windows. La única diferencia entre los códigos es la numeración, que hace referencia a la columna del *csv* que corresponde con el dato.

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_2a30_all_returns_elevation_stats.csv 12 C:\TFMSILVIA\RASTER\CV_arbolado.asc
```

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_2a30_all_returns_elevation_stats.csv 26 C:\TFMSILVIA\RASTER\P10_arbolado.asc (anexo 5)
```

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_2a30_all_returns_elevation_stats.csv 28 C:\TFMSILVIA\RASTER\P25_arbolado.asc (anexo 6)
```

```
Csv2grid C:\TFMSILVIA\CSV\estadisticos_2a30_all_returns_elevation_stats.csv 36 C:\TFMSILVIA\RASTER\P90_arbolado.asc (anexo 7)
```

Para despejar el valor de la densidad de copa se aplicó al exponencial del valor calculado anteriormente mediante la herramienta *Raster Calculator*.

$$\text{Canopy bulk density} = \text{Ln}(\text{cbd}) ^ 2.71828$$

Una vez se han obtenido todas las variables, se ha comprobado que estaban proyectadas en las mismas coordenadas, y que el archivo ráster tiene las mismas extensiones. Por otro lado, se ha convertido a ráster la capa de modelos de combustible. Una vez tenemos todos los archivos, se han transformado a formato *ASCII* a través de la herramienta *raster to ASCII*, ya que es el archivo de entrada que acepta el simulador para generar el archivo *LCP*.

8.2 Otros parámetros necesarios para el funcionamiento del archivo LCP

Una vez se ha creado el archivo *LCP*, el programa de simulaciones de incendio necesita otros parámetros que van ligados a las condiciones que van a recrear el incendio forestal. Estos archivos van a contener información relacionada con la humedad del combustible, la temperatura y el viento.

Humedad del combustible: Se introduce en un archivo de texto, este contiene en porcentaje la cantidad de humedad presente en el combustible antes de iniciarse el incendio. Este archivo se distribuye en 5 columnas que representan, el modelo de combustible, en nuestro caso de estudio del 0 al 8, seguido de la humedad del combustible muerto, que se clasifica en 3 formas, el combustible muerto en 1 hora, en 10 horas y en 100 horas. Por último, se observa en el archivo *ASCII* la humedad de combustible vivo y la humedad del combustible muerto. El combustible muerto es todo lo que hace referencia a vegetación herbácea y el combustible vivo, es toda la vegetación relacionada con las leñosas (Silva Urquiza, 2017).

Se ha seleccionado la humedad en combustible de leñosas con un valor de 60% y en herbáceas con un valor de 50% según lo establecido en el análisis de la cantidad de humedad de combustible vivo de la Comunidad Valenciana teniendo en cuenta que se trata del mes de julio, y la cantidad de humedad disminuye debido a las altas temperaturas de la estación veraniega (Soriano Sancho, 2017). Para los combustibles muertos la humedad inicial fue, un 6% para los combustibles de 1 hora, un 8% para los combustibles de 10 horas y un 10% para los combustibles de 100 horas. Estos 3 últimos valores se dejaron en niveles predeterminados por el programa.

```
FUEL_MOISTURES_DATA: 7
FuelMod 1Hour 10Hour 100Hour LiveH LiveW
0 6 8 10 50 60
2 6 8 10 50 60
4 6 8 10 50 60
5 6 8 10 50 60
6 6 8 10 50 60
7 6 8 10 50 60
8 6 8 10 50 60
```

De esta manera, cuanto menor sea la humedad que contiene el combustible, mayor va a ser la velocidad de propagación, la intensidad del fuego y el combustible consumido. Los factores ambientales que influyen en la humedad del combustible son:

- La temperatura del aire: Las altas temperaturas contribuyen a acelerar el ritmo de evaporación de la vegetación y del suelo, provocando de esta manera un requerimiento menor de energía para que se produzca la inflamación (Julio & Giroz, 1975).
- La humedad relativa del aire: El problema se genera cuando los niveles de humedad en el aire son bajos, ya que su efecto es parecido al de altas temperaturas, contribuyendo a reducir el contenido de humedad en la vegetación (Julio & Giroz, 1975).

- La radiación solar
- La precipitación

Estos factores se han incorporado a los otros dos archivos de entrada necesarios para la simulación del incendio. Al ser una recreación de un incendio del año 1995, se ha intentado conseguir datos lo más fiables posibles. En primer lugar, se ha accedido a la página web de *Avamet* (<https://www.avamet.org/>) (Asociación Valenciana de Meteorología), para buscar los datos del 13 de julio de 1995, pero estos no están disponibles, ya que la estación meteorológica que pertenece al municipio de Sella (Alicante) fue implantada posteriormente. Por esta razón, se va a trabajar con los datos meteorológicos de temperatura y viento según lo dictado en el análisis del plan de prevención de incendios forestales (Generalitat Valenciana, 2007).

La temperatura y la precipitación son dos variables que inciden directamente en la cantidad de humedad que hay en el combustible y, como consecuencia, en el nivel de inflamabilidad.

El archivo del tiempo atmosférico (WTR) incluye las siguientes variables:

- Temperatura del aire: valores mínimos y máximos alcanzados durante el día, dictando en el archivo *ascii* la hora con el mínimo valor de temperatura y la hora con el máximo.
- Precipitación: cantidad y duración de cada día.
- Humedad relativa del aire: mínimo y máximo alcanzado cada día del incendio.

Tanto para el archivo de tiempo atmosférico (WTR), como para el de viento (WND) las variables deben ser números enteros y cada columna debe estar delimitada por espacios. Por otro lado, Flammap permite entradas meteorológicas en inglés o en unidades métricas. Para este trabajo se han seleccionado las unidades en inglés, situándolo en la primera línea del archivo WTR y WND.

El archivo WTR contiene las siguientes variables, en el siguiente orden:

Month Day Precip Hour1 Hour2 Temp1 Temp2 Humid1 Humid2 Elevation rt1 rt2

ENGLISH

7 13 0 400 1500 76 86 30 15 900 0 0

7 14 0 600 2000 78 87 40 15 900 0 0

Por otro lado, otro de los factores fundamentales en un incendio forestal es el viento. Ciertamente es que la influencia del viento en los incendios va ligada a otras condiciones como son las topográficas, en concreto la pendiente, la orientación y el tipo de combustible. Esto quiere decir que en zonas con alta densidad de arbolado, independientemente de la posición de la ladera, el efecto del viento sobre el combustible se verá atenuado por la masa arbolada, por otro lado, en zonas sin arbolado, ocurre lo opuesto, viéndose así afectados los combustibles de una manera más fuerte, ya que no hay ninguna barrera que obstaculice el efecto (Molina, Bardaji, & Castellnou, 1998).

El archivo del viento (WND) incluye los siguientes parámetros:

- Velocidad del viento (km/h) diaria y horaria
- Dirección del viento en grados diaria y horaria
- Nubosidad, representando la cobertura en % diaria y horaria

Esta sería la estructura de los datos que se ha incorporado al archivo WND, teniendo en cuenta que se ha realizado una estimación aproximada según los datos del informe sobre el incendio:

Month Day Hour Speed Direction CloudCover

ENGLISH

07 13 400 15 160 10

07 13 500 15 160 10
07 13 600 16 160 10
07 13 700 17 160 10
07 13 800 15 160 20
07 13 900 15 160 20
07 13 1000 16 160 20
07 13 1100 17 160 10
07 13 1200 18 160 10
07 13 1300 19 160 10
07 13 1400 20 160 10
07 13 1500 18 160 10
07 13 1600 18 160 10
07 13 1700 17 160 10
07 13 1800 16 160 5
07 13 1900 15 160 5
07 13 2000 15 160 5
07 13 2100 15 160 5
07 13 2200 15 150 0
07 13 2300 15 150 0
07 13 0000 15 150 0
07 14 100 15 150 0
07 14 200 15 150 0
07 14 300 10 150 0
07 14 400 11 150 0
07 14 500 11 150 0
07 14 600 11 150 0
07 14 700 10 150 0
07 14 800 10 150 0
07 14 900 10 150 0
07 14 1000 10 150 10
07 14 1100 11 150 10
07 14 1200 11 150 10
07 14 1300 10 150 5
07 14 1400 10 150 5
07 14 1500 10 150 5
07 14 1600 10 150 5
07 14 1700 10 150 10
07 14 1800 5 150 5

9. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN EN FLAMMAP

Tras el exhaustivo análisis del incendio ocurrido en julio de 1995 en el barranco de Tagarina, la aplicación y ajuste de las variables de entrada, se ha procedido a simular el comportamiento del fuego e identificar los puntos críticos del mismo.

El simulador de incendios *Flammap* es estático, es decir, el software realiza un análisis del comportamiento del fuego para cada píxel independientemente del lugar de inicio del fuego, así se han definido las zonas del barranco en las que el fuego presenta un comportamiento por encima del umbral de la capacidad de extinción (Molina Terrén, Grillo Delgado, & García Marco, 2016).

Los resultados obtenidos en *Flammap* se han trasladado a *ArcGis* para poder trabajar los datos con mayor facilidad y posteriormente plasmarlos en mapas. *Flammap* lleva incorporado los modelos más comunes, es decir *Behave* y *Farsite*, que se basan en la ecuación de propagación del fuego original de Rothermel y describen la propagación y el comportamiento del fuego teniendo en cuenta todas las variables explicadas anteriormente, es decir, la influencia de los combustibles, el terreno sobre el que se produce el incendio y las condiciones climáticas.

9.1 Principales ejes de propagación del incendio

Según el informe del plan de prevención de incendios, sobre análisis histórico (Generalitat Valenciana, 2007) el incendio se generó cerca de uno de los caminos que atraviesa el barranco, delimitado como pista forestal. Como se analiza en la figura 14, desde el punto del inicio del incendio es de donde se originan el conjunto de ejes. Las zonas más críticas corresponden a las zonas donde los ejes principales se ramifican. Se observa que los ejes no llegan hasta el final del barranco por la parte este, ni en la figura 14 ni en la figura 15, debido a que esta zona del barranco, según el simulador de incendios *Flammap* no ha tomado parte en el incendio recreado.



Figura 14: Principales ejes de propagación del incendio (en color amarillo) a partir del punto donde se origina el mismo.

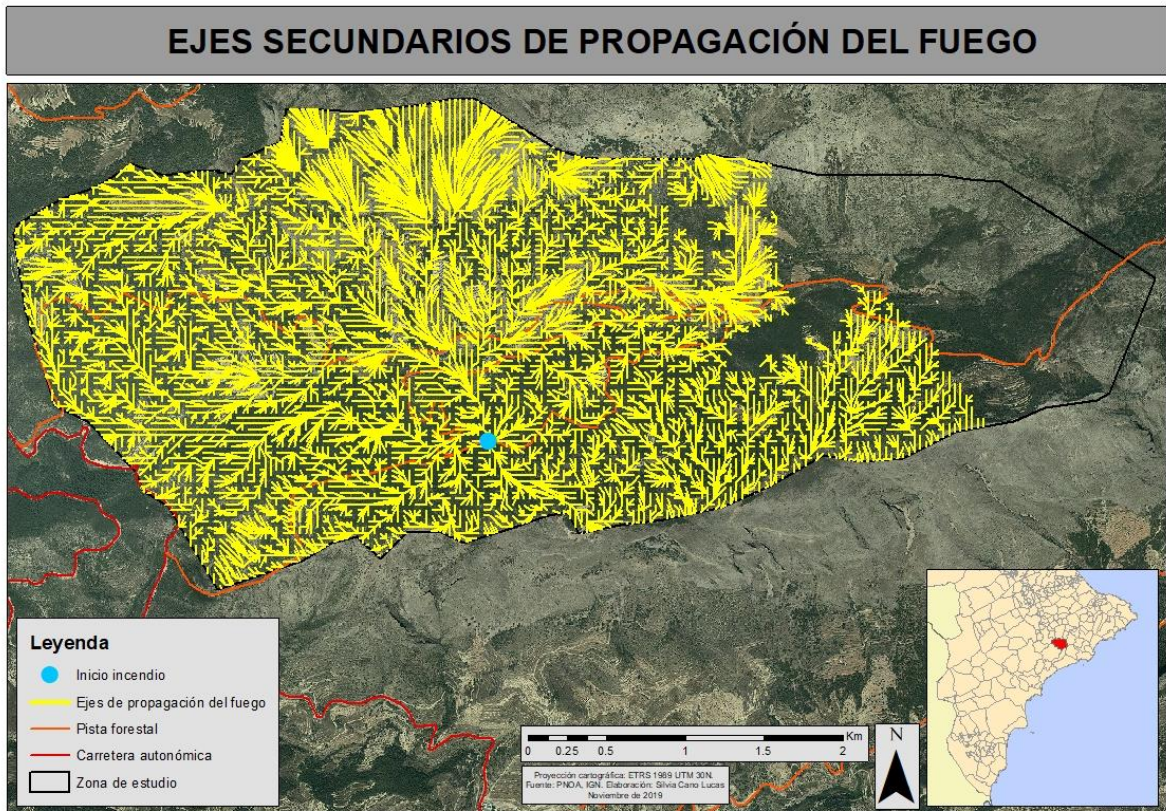


Figura 15: Ejes secundarios de propagación del fuego.

9.2 Longitud de la llama

La longitud de la llama es una variable clara que proporciona información sobre el estado del incendio. En la siguiente figura (figura 16) se observa la longitud de la llama alcanzada en metros para cada píxel en el barranco desde la superficie hasta la punta de la llama.

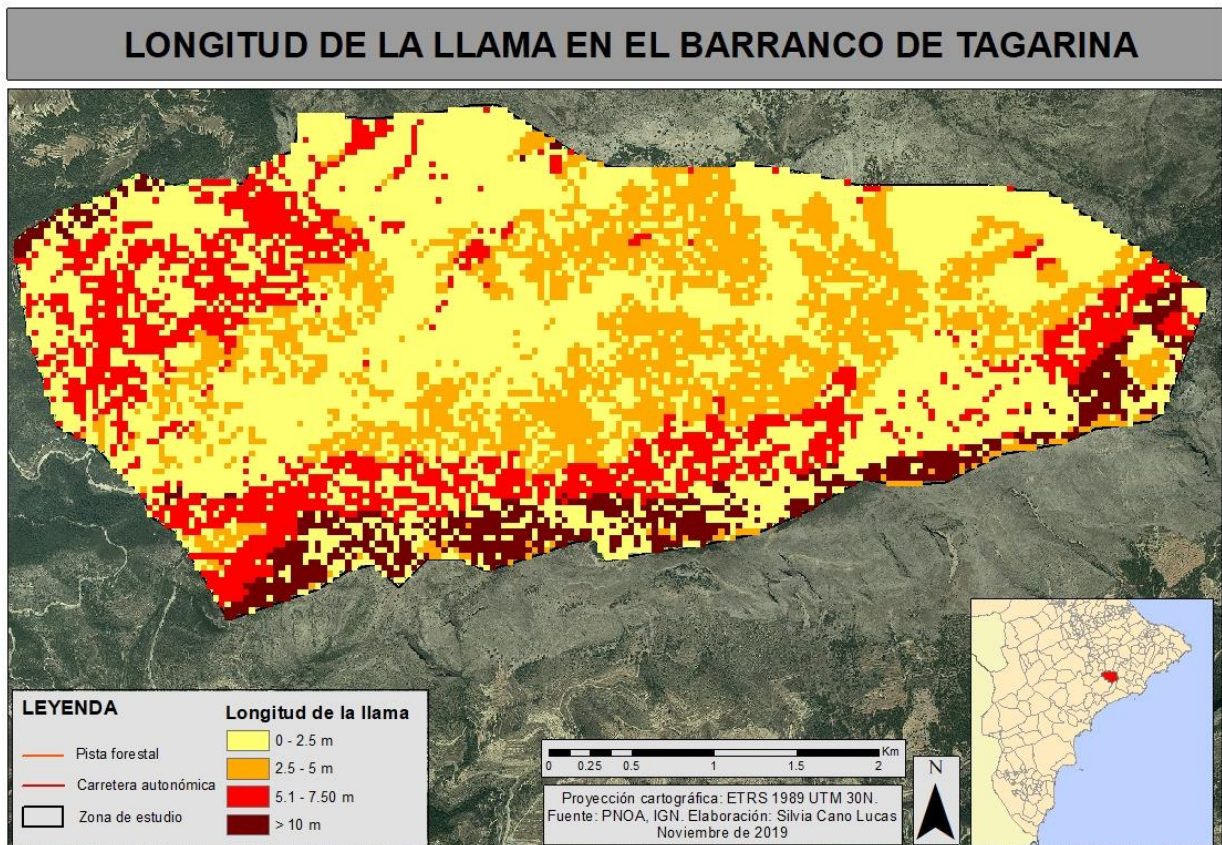


Figura 16: Longitud de la llama (m) obtenida en el simulador Flammap para el Barranco de la Tagarina.

Las zonas más oscuras corresponden a las zonas donde la llama supera los 10 metros, este fenómeno se produce en zonas altas del barranco. Se ha clasificado en 4 categorías, según el alcance, de menor a mayor. Las zonas en tonos más claros se observan en zonas bajas del barranco, en zonas donde predomina el modelo 2 de combustible, es decir, los cultivos y en zonas donde se encuentra el matorral.

9.3 Alcance del incendio

Como se ha comentado con anterioridad, el incendio de Tagarina tuvo una duración estimada de 40 horas hasta su total extinción, desde las 04:00 h de la madrugada del 13 de julio de 1995 hasta las 20:00 h de la tarde del día 14 de julio. En el simulador de incendios *Flammap*, una de las posibilidades es indicar el tiempo de duración del incendio en minutos. Las 40 horas del incendio equivalen a 2400 minutos. Se puede observar en la figura 17, el avance del incendio teniendo en cuenta las variables introducidas en el programa.

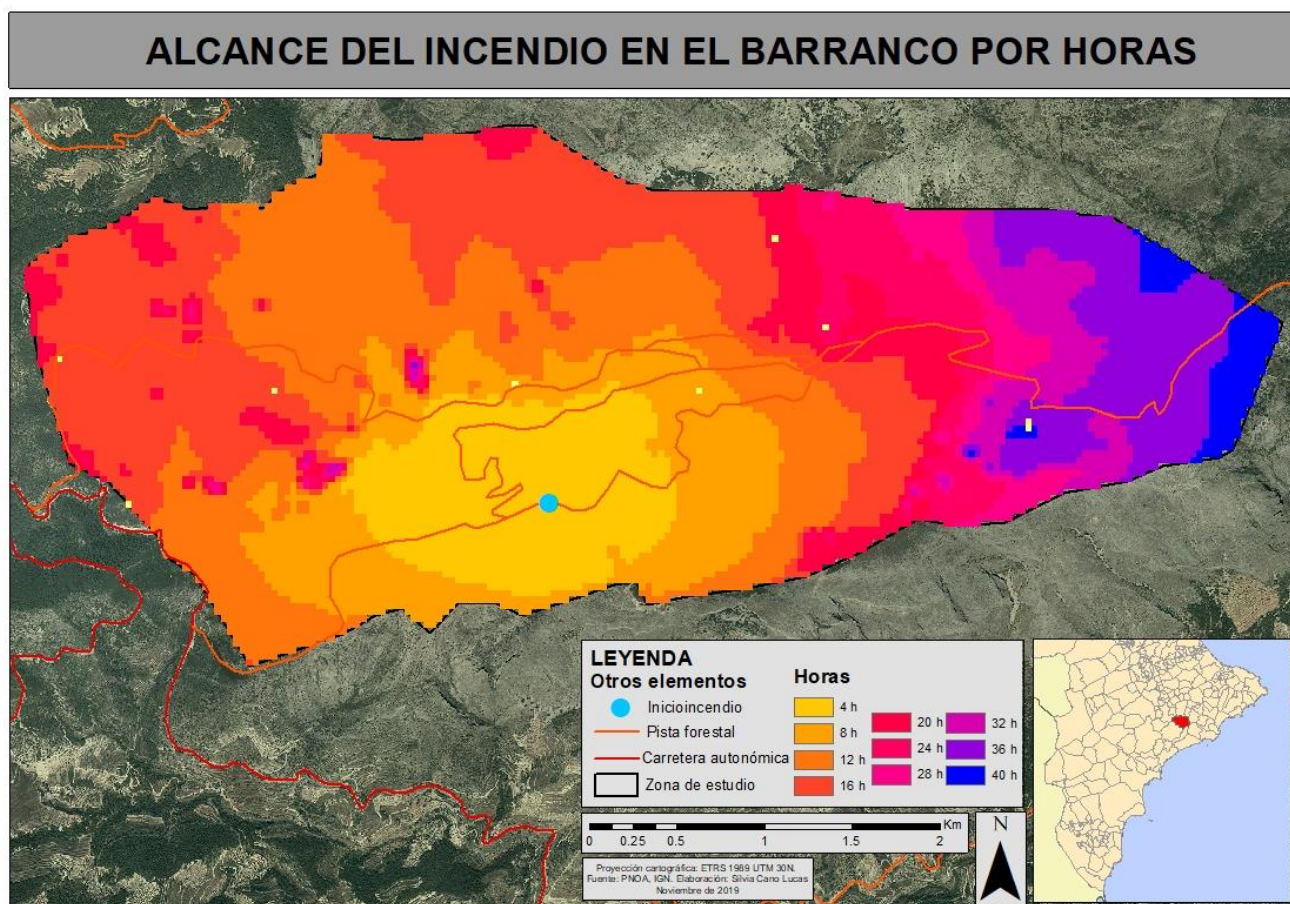


Figura 17: Alcance del incendio desde el punto de inicio. Clasificado por horas desde que se inicia hasta que se apaga.

9.4 Velocidad de propagación

La velocidad de propagación hace referencia al rango de incremento o expansión de un incendio, en este caso medido en forma lineal en metros por minuto. Un incendio superficial puede crecer a un ritmo de 50 a 200 metros por hora. La velocidad de propagación es una clave fundamental, ya que puede ser muy predecible, siempre que se conozca el tipo de combustible por el cual se están desplazando. Cabe destacar que la situación es poco predecible cuando se presentan incendios de copa (Julio & Giroz, 1975). Como se puede observar en la figura 18, la zona central del barranco tiene una velocidad de propagación de 1 metro por minuto, lo que quiere decir que estaría dentro de las posibilidades de extinción. Las zonas más críticas y donde se produciría una velocidad mayor serían las zonas más elevadas de la ladera, que comparando con el mapa de combustibles sería la zona donde se encuentra presente el

modelo 8 de combustible, es decir hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas y los modelos de matorral 4, 5 y 6.

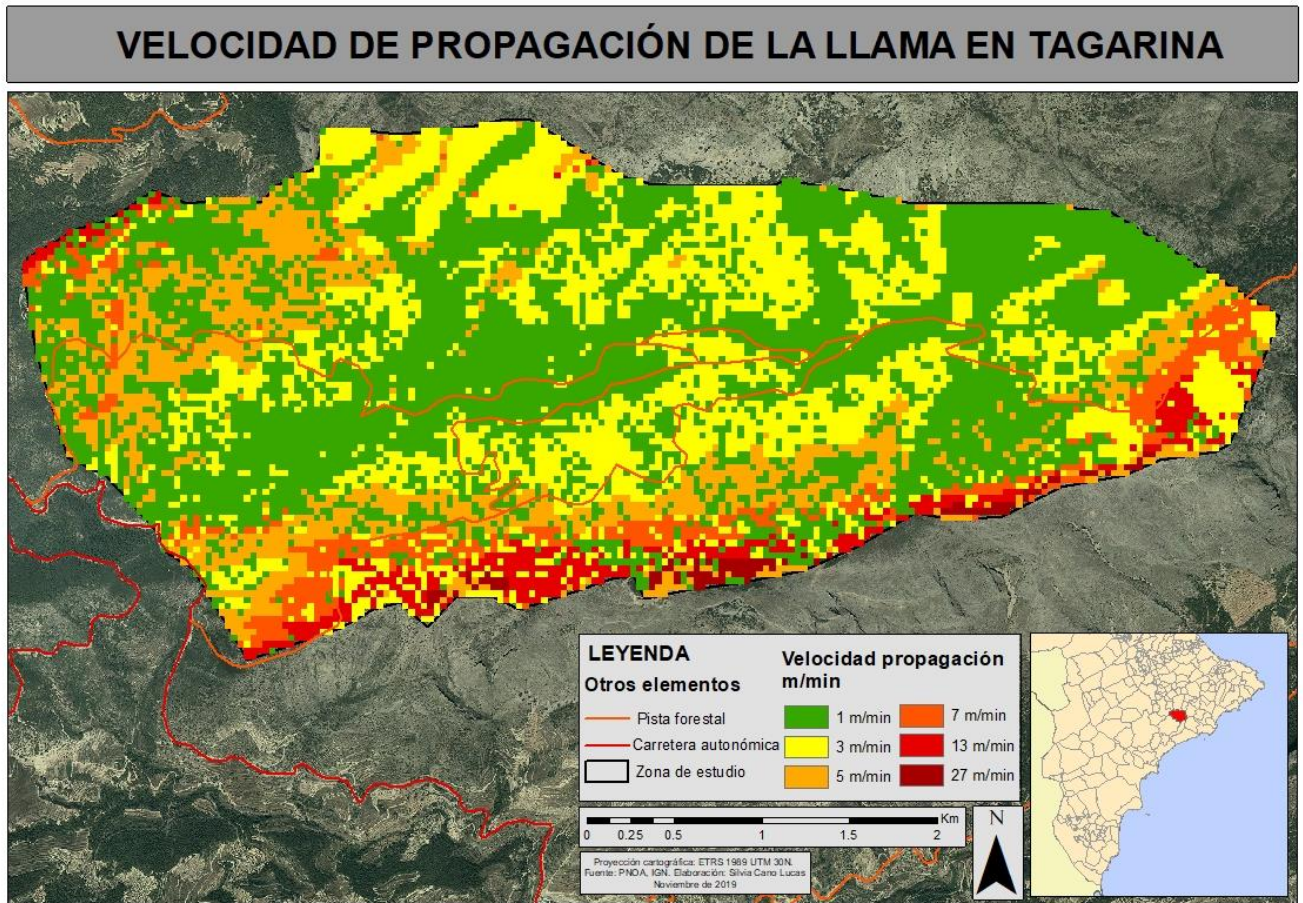


Figura 18: Velocidad de propagación del incendio calculado en metros por minuto en el simulador Flammap.

9.5 Actividad del fuego en las copas de los árboles

En la figura 19 podemos observar cómo se comportaría el fuego en las copas de los árboles, teniendo de un total de 4 categorías, tan solo 3 en nuestra zona, ya que el simulador Flammap clasifica como actividad nula, baja, media o alta. En las zonas del norte del barranco hay una actividad baja de copas, que corresponde en el mapa de combustible con el modelo 5 de matorral. Por otro lado, hay actividad de copas en zonas donde hay modelo 8, es decir, hay presencia de vegetación frondosa. La actividad de copas indica en que zonas del mapa el fuego ha alcanzado las copas de los árboles. Esto es un indicador de peligrosidad, ya que en un incendio generalmente cuando se alcanzan las copas de los árboles indica que se supera la capacidad de extinción.

ACTIVIDAD DE COPAS

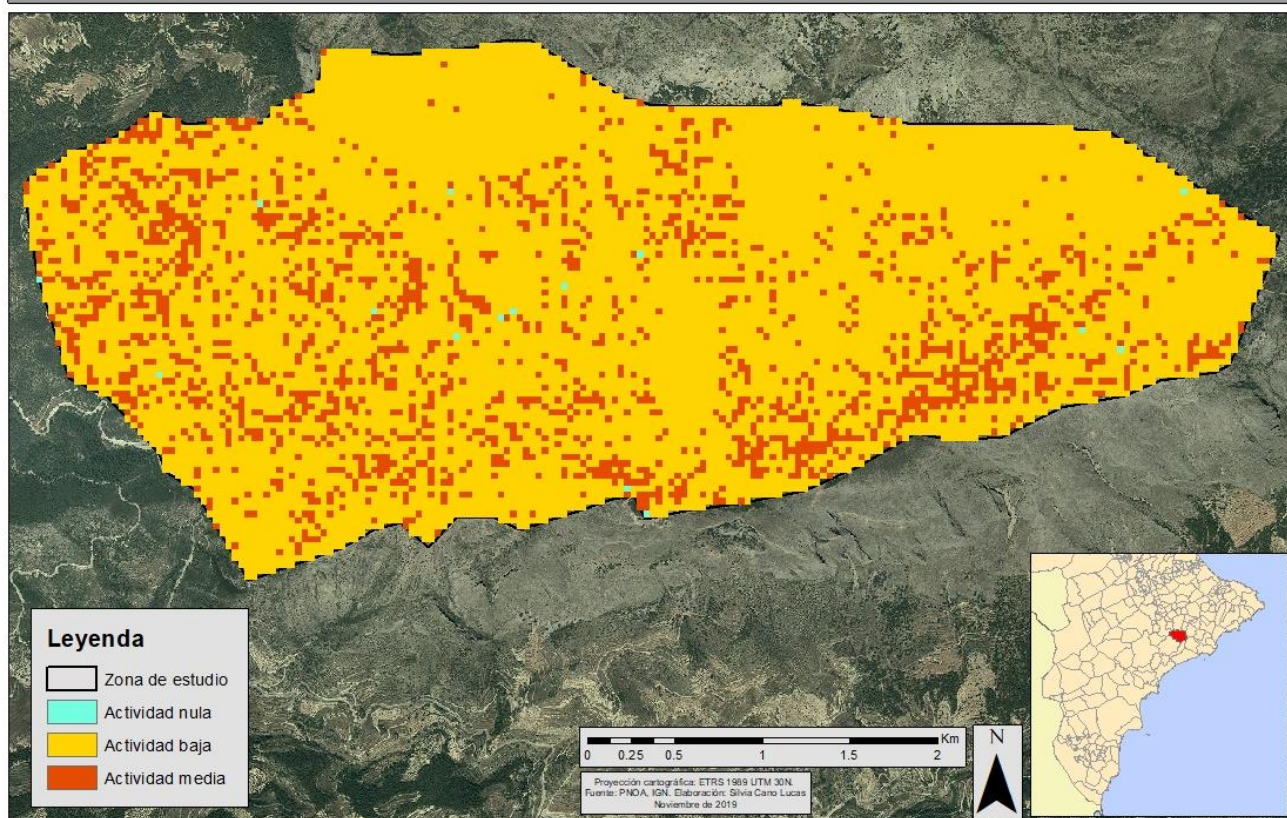


Figura 19: Actividad de las copas en el barranco de Tagarina obtenido mediante el simulador de incendios Flammap.

9. DISCUSIÓN

Se han comparado dos metodologías de cartografía de combustible con la finalidad de validar el modelo de combustible presente en Tagarina, por un lado, con fotointerpretación y por otro lado con el empleo de datos LiDAR.

Una vez se han obtenido los dos mapas, se podría haber utilizado el mapa de fotointerpretación para realizar la simulación, pero se ha creído conveniente hacer uso de la cartografía obtenida a partir de los datos LiDAR y no de otras fuentes, como imágenes de satélites, debido a que el dosel vegetal se representa con una mayor precisión y es de mayor utilidad de cara a la simulación, para obtener exactitud en los resultados.

Después de haber generado una primera simulación, el resultado mostró que era necesario realizar ajustes en las diferentes variables del programa. Tras realizar sucesivas simulaciones y los ajustes necesarios en todas ellas, se ha obtenido como resultado la recreación más precisa de lo que pudo suceder en Tagarina en 1995, haciendo una aproximación del comportamiento real que tiene el fuego en cada píxel según las condiciones establecidas. No se ha pretendido conseguir que, en la simulación del incendio, el perímetro quemado fuese exactamente igual al ocurrido en Tagarina en 1995, esto sería difícil de lograr. Con Flammap se ha determinado el patrón de comportamiento del incendio bajo las condiciones establecidas en el *lcp* y los archivos de combustible, atmosféricos y viento.

Han surgido una serie de problemas a la hora de generar el archivo *lcp*, ya que, todos los ráster convertidos a *ascii* han tenido que ser reclasificados según los parámetros establecidos en Flammap, para no tener problemas de lectura y posteriores problemas en la simulación.

Se ha escogido el simulador de incendios Flammap, debido a la cantidad de autores que han trabajado con *Farsite*, que es la versión más antigua y que en la actualidad se encuentra incorporada en el software. Además, porque otros simuladores trabajan con otras variables, siendo este el más acorde con la vertiente de estudio del máster.

Una vez simulado el incendio, se observa cómo hay zonas que quedarían fuera de la capacidad de extinción, las áreas que han alcanzado grandes intensidades en la longitud de la llama, alcanzando valores por encima de los 10 metros de altura y las zonas con una alta velocidad de propagación, alcanzando algunas zonas con más de 13 metros por minuto, que coinciden entre sí y con las zonas forestales densamente pobladas. De esta manera, los resultados del simulador coinciden con el comportamiento teórico del fuego. Estas zonas son de difícil acceso y actuación para la extinción de los medios.

Por otro lado, el simulador tiende a sobrepasar la propagación de tasa de fuego como se observa en la figura 17 sobre el alcance del incendio, en la que en la zona este del barranco se predice comportamiento del fuego, pero como se observa en los ejes de propagación (figuras 14 y 15), el fuego no se extiende hasta allí. Como indican algunos autores, en el manual de usuario de Flammap, todos los modelos de combustible tienden a predecir en exceso la tasa de propagación del fuego (Brakeall, 2013).

Por otro lado, se esperaba que hubiese zonas que superasen el umbral de extinción, ya que según el análisis histórico (Generalitat Valenciana, 2007) se sabe que el incendio de 1995 fue de gran intensidad.

La inflamabilidad varía con el grado de humedad del combustible vegetal, que en este caso de estudio era inferior al tratarse de una época estival y de sequía. Según el simulador de incendios, las zonas más afectadas en lo que se refiere a combustible, son las zonas que corresponden con el modelo 8, es decir hojarasca compacta, sufriendo más intensidad en la velocidad de propagación y altura de la llama en las zonas más altas del barranco y por otro lado, el modelo 4 de matorral, que corresponde con el matorral o arbolado joven muy denso que no supera los 2 metros de altura, pero que está rodeado por abundancia de combustible leñoso muerto y hace que la propagación sea muy rápida en las copas del matorral. También son zonas con alto potencial de peligrosidad aquellas donde se encuentra el modelo 5, es decir el matorral denso, pero bajo y que se propaga con facilidad con vientos flojos, este último predomina en las zonas más altas del barranco (Tejedo Sanz, 2007).

Se ha elegido el modelo Rothermel, y posterior adaptación del modelo Prometheus debido a que es un modelo aceptado por el programa *Flammap* y porque es el que corresponde con el Plan de Silvicultura de incendios en los Sistemas Forestales de la Comunidad Valenciana, por tanto, es acorde con el combustible de la zona (Conselleria de Medi Ambient, 1996).

Los resultados obtenidos son similares a los trabajos desarrollados en los términos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué (Resano Toledo, 2018) y en el Parque Natural de la Sierra Calderona (Valencia) (Silva Urquizo, 2017), especialmente en el patrón seguido por el simulador, lo que hace procedente el uso de esta metodología.

10. CONCLUSIONES Y PREVISIONES DE FUTURO

Se ha confirmado que el uso de datos del proyecto LiDAR – PNOA es una fuente de información de carácter muy útil y competitiva, porque en primer lugar se ha podido analizar el dosel vegetal de manera exhaustiva y posteriormente utilizar esos datos con otra finalidad sin la necesidad de tomar datos en campo, que supondrían un mayor esfuerzo y coste económico.

A pesar del incremento de los incendios forestales en la cuenca mediterránea, y de los graves problemas que generan, siendo uno de los principales impactos medioambientales y socioeconómicos, el fuego es necesario para el correcto funcionamiento del ecosistema en los bosques mediterráneos según numerosos estudios. Hay que recalcar que el régimen de incendios ha sufrido cambios debido a las nuevas tendencias sociales y económicas, pero también a las políticas forestales de supresión de fuego, que restringen las talas y quemas. Por esta razón, la reconstrucción de un incendio es un elemento clave para la prevención y la previsión de comportamientos futuros, ya que permite el diseño, la planificación y el conocimiento a cerca de donde ubicar infraestructuras que sirvan para frenar el fuego como

cortafuegos, caminos o zonas de seguridad, destacando que en Tagarina tan solo hay una pista forestal que atraviesa el barranco y que en caso de incendio el acceso puede ser muy complicado. También es interesante simular un incendio de cara a la elaboración de planes de prevención de incendios forestales o planes de control y de emergencia.

El desarrollo de nuevas tecnologías como son los Sistemas de Información Geográfica y los novedosos y no tan nuevos simuladores de incendios forestales, resultan imprescindibles en la eficacia de la protección contra los ecosistemas. Una herramienta gratuita puede ayudar a reducir muchísimo el coste total de la gestión de bosques e incendios.

El simulador de incendios *Flammap* es una herramienta muy útil en lo que se refiere a la evolución de un incendio forestal, con mucho más potencial si se trabajasen los datos en tiempo real. Usando los parámetros observados *in situ* de temperatura, viento y humedad del combustible, los resultados podrían ser mucho más precisos.

Aun así, no se debería esperar al día del incendio para identificar los problemas y oportunidades para sofocarlo o prevenirlo. El resultado obtenido muestra que la inclusión de parámetros climáticos como el viento y la temperatura, junto a la cartografía de modelos de combustible es necesaria para obtener simulaciones razonables en incendios forestales.

Para finalizar, y como propuesta, se podría llevar a cabo un estudio continuado del dosel vegetal a partir de los datos LiDAR, para observar la evolución de la estructura de la vegetación e ir realizando medidas correctoras según surgiesen problemas, pero para ello se necesitaría la captura de datos con más frecuencia.

La previsión de futuro no tiende a mejorar, en el municipio de Sella y en toda la provincia de Alicante, no se opta por invertir en el sector primario, ya que el sector terciario, en concreto el turismo es la potencia económica de la provincia. Por esta razón, se deben buscar alternativas para paliar los efectos de la degradación de los bosques mediterráneos, o bien aplicando medidas de silvicultura, regulando la quema y tala de combustible o haciendo estudios continuados sobre el estado de la estructura vegetal.

BIBLIOGRAFÍA

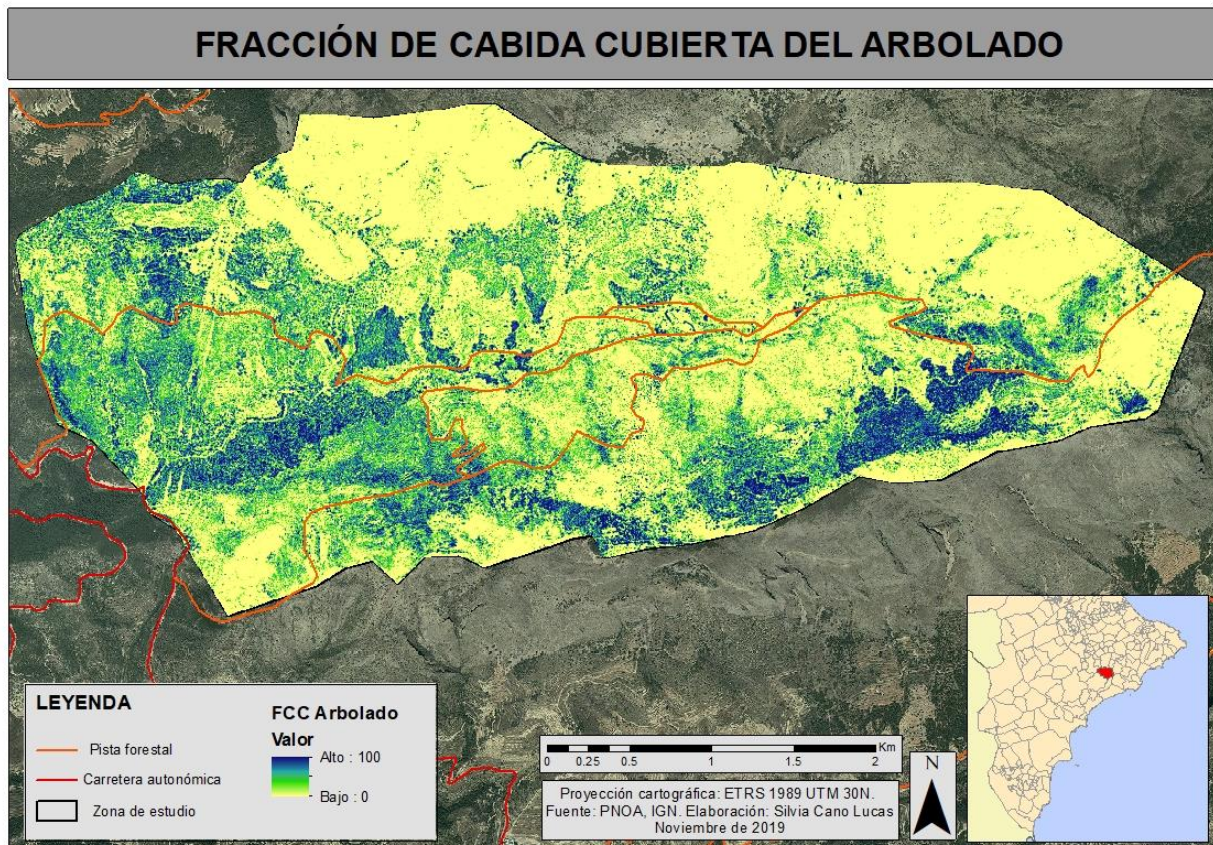
- Andersen, H. E., McGaughey, R. J., & Reutebuch, S. E. (2005). Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 441-449.
- Arroyo, L., Pascual, C., & Manzarena, J. (2008). Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing . Technical University of Madrid (UPM).
- Bodí, M. B., Cerdà, A., Mataix Solera, J., & Doerr, S. H. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo de la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 33-55.
- Brakeall, J. (2013, Febrero). Wildfire Assessment Using FARSITE Fire Modeling: A case study in the Chihuahua Desert of Mexico. *FIU Electronic Theses and Dissertations* . Florida International University.
- CNIG. (2019, 10 11). *Centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional*. Retrieved from <http://centrodedescargas.cnig.es/>
- Conselleria de Medi Ambient. (1996, Febrero). Plan de Selvicultura Preventiva de Incendios en los Sistemas Forestales de la Comunidad Valenciana. *Memoria*. Generalitat Valenciana: Tragsatec.
- ESRI, A. (2019, 11 11). *ESRI*. Retrieved from ArcMap: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-a-las-dataset-.htm>
- Felicísimo, A. M. (2019). *El modelo digital de elevaciones*. Retrieved from <http://www6.uniovi.es/~feli/index2.html>
- Fernández Alonso, Ó. (2016, Julio). Estimación de modelos de combustible basada en datos de sensores remotos. *Trabajo fin de máster*. Universidad de Oviedo.
- Generalitat Valenciana, C. . (2007). *Plan de prevención de incendios de la demarcación de Altea, análisis histórico de incendios*. Valencia: VAERSA (Gabinete técnico de ingeniería, estudios y proyectos).
- Hoffrén Mansoa, R. (2018, Junio). Modelado geoestadístico del combustible forestal en paisajes de *Pinus halepensis* Mill. mediante datos LiDAR y de campo. Zaragoza, Trabajo fin de grado: Universidad de Zaragoza.
- Julio, G., & Giroz, G. (1975). Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales. *Bosque*, 18-27.
- Madrigal, J., Hernando, C., Guijarro, M., & J, V. A. (2014). Distribución de biomasa en las copas y el matorral tras claros mecanizados intensos de regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* Ait.: implicaciones para la prevención de incendios de copa. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 123-140.
- Marino, E., Ranz Vega, P., Tomé, J. L., & Noriega, M. A. (2016). Cartografía de alta resolución de modelos de combustible forestal: metodología de bajo coste basada en datos LiDAR. *Foresta*, 34-42.
- McGaughey, R. J. (2018, Agosto). FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. United States Department of Agriculture, Forest Service - Pacific Northwest Research Station: FUSION Version 3.8.
- Molina Terrén, D., Grillo Delgado , F., & García Marco, D. (2016). Uso del fuego prescrito para la creación de rodales cortafuegos: estudio del caso de las mesas de Ana López, Vega de San Mateo, Gran Canaria (España). *Universidad de Lleida, Unidad de Fuegos Forestales*. Cabildo de Gran Canaria, Servicio de Medio Ambiente, España.
- Molina, D. M., Bardaji, M., & Castellnou, M. (1998). Probabilidad de ignición, grandes incendios y dificultad de extinción. *Ecología n° 12*, 333-350.
- Molina, D. M., Castellnou, M., & Plant, R. E. (2001). Simulación de incendios forestales en ordenador para la planificación: Estado del arte en Cataluña. Cataluña .
- Montealegre, A. L. (2017). 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. *Tesis de la Universidad de Zaragoza*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Novo, M., & Marey, M. F. (2014). Gestión de combustible vegetal para la prevención contra incendios forestales. *Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Lugo*. Universidad de Santiago de Compostela.
- Piqueras Haba, J. (2012). *Geografía del territorio valenciano (naturaleza, economía y paisaje)*. Valencia: Ayuntamiento de Requena.
- Ramírez Cisneros, J., Blanco Martínez, J., Cerrillo Cuenca, A., Marqués Rodríguez, G., Valcarce Diñeiro, R., & Llordén Pozo, J. M. (2013, Junio 10 - 14). Generación de cartografía de modelos de combustible a partir de datos LiDAR y análisis de imágenes orientado a objetos para su integración en Wildfire Analyst. *Montes: Servicios y desarrollo rural*. Vitoria - Gasteiz: Sociedad española de ciencias forestales.
- Resano Toledo, J. (2018, Marzo). Información LiDAR y cartografía para determinar el comportamiento de incendios forestales en los terminos municipales de Cáseda, Gallipienzo, Javier y Ujué. *Trabajo fin de grado*. Pamplona, Navarra: Universidad pública de Navarra.
- Rosales León, J. J., & Rodrigo Bello, J. J. (2012). Tecnología LiDAR aplicada a la gestión del territorio. *Tierra y Tecnología*, 57-59.
- Rothermel, R. C. (1972, January). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Intermountain forest and range experiment station*. Ogden, Utah, USDA Forest Service.
- Ruiz García, A. (2009). Aportación del LiDAR aerotransportado al cálculo de cambios en las playas tras temporales. *Revista Catalana de Geografía*, 14(37).
- Silva Urquizo, E. R. (2017, Abril). Integración de un simulador de la evolución de incendios forestales en sistemas de mando y control para la gestión de emergencias. Valencia, Trabajo fin de máster: Universidad politécnica de Valencia.
- Soriano Sancho, J. L. (2017, Junio). Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunidad Valenciana. *7º congreso forestal español*. Sociedad española de ciencias forestales: vaersa grupo.
- Tejedo Sanz, P. (2007). Mejorando la calidad de la valoración del riesgo local de incendio: aplicación al futuro Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Universidad de Segovia.
- Tomé Morán, J. L., Fernandez Landa, A., & Ranz Vega, P. (2014). Elaboración de cartografía forestal en canarias a partir de datos LiDAR. In C. 13, *Gestión y planificación en los ecosistemas forestales, bloque 2* (pp. 185-200). Dialnet.
- U.S, F. (2019, Octubre 19). *Fire, Fuel, Smoke Science Program*. Retrieved from United State Departament of Agriculture: <https://www.firelab.org/project/flammap>
- Vélez Muóz, R. (2009, Noviembre). Los incendios forestales en la cuenca mediterránea. *Memorias del tercer simposio internacional sobre economía, planificación y políticas de los incendios forestales: problemas y enfoques comunes*. Forest Service, Departament of agriculture: United States .

Índice de anexos

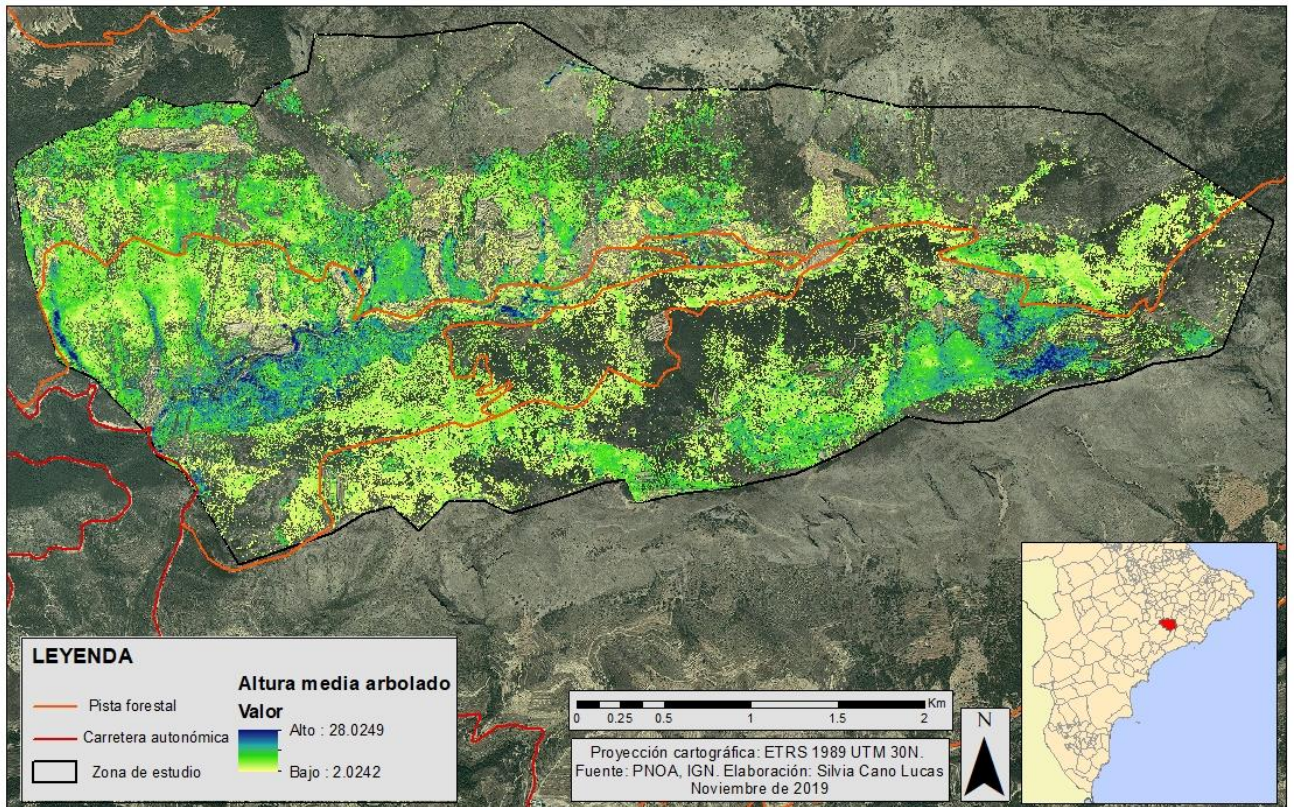
Anexo 1: Mapa de fracción de cabida cubierta del arbolado. Los tonos azulados corresponden con las zonas donde más concentración de arbolado existe.	32
Anexo 2: Mapa de altura media del arbolado.	33
Anexo 3: Mapa de orientaciones en grados del Barranco de Tagarina.	33
Anexo 4: Mapa de pendientes del barranco de Tagarina. Las zonas en color blanco y marrón oscuro se corresponden con las zonas donde más cambio de pendiente se produce.	34
Anexo 5: Percentil de 10% de altura de la vegetación.....	34
Anexo 6: Mapa percentil 25 de altura de la vegetación.	35
Anexo 7: Mapa percentil 90 de altura de la vegetación.	35

ANEXOS



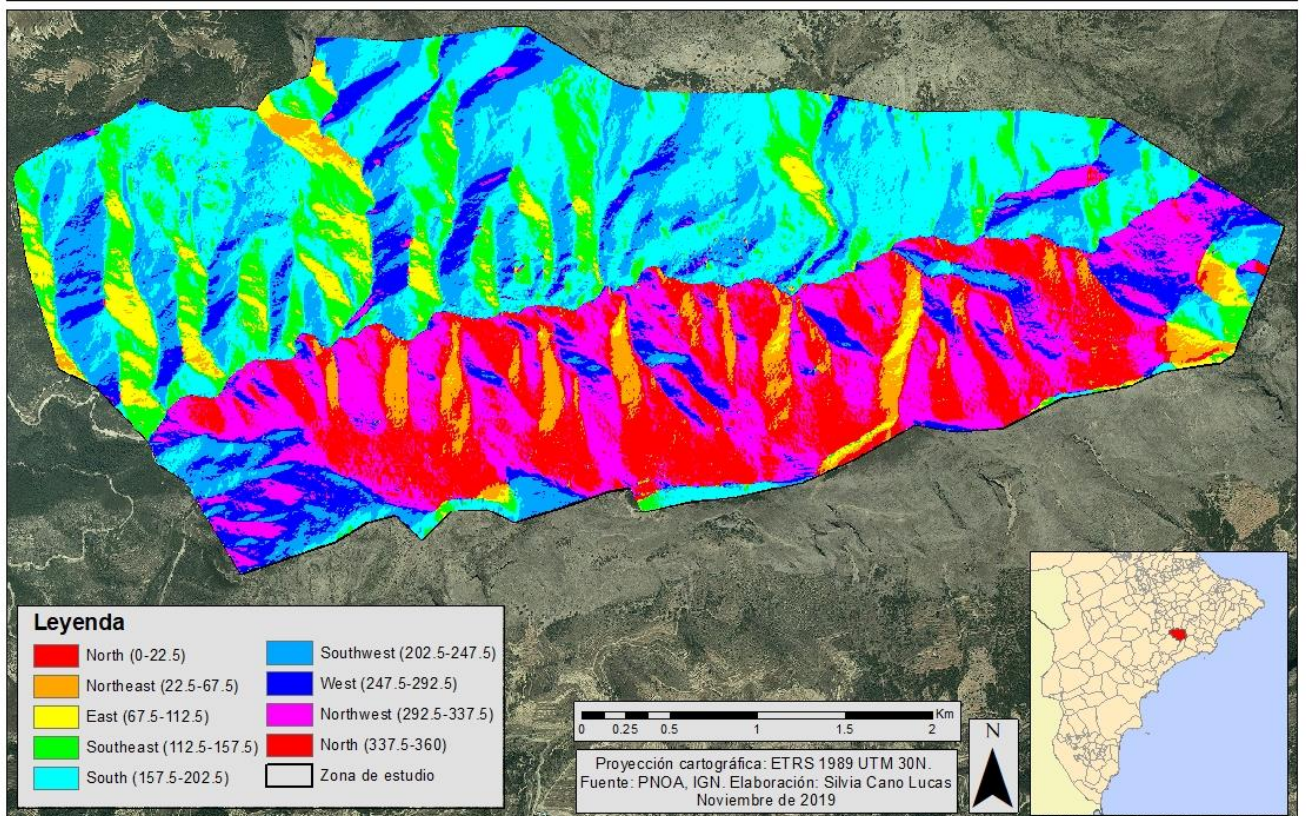
Anexo 1: Mapa de fracción de cabida cubierta del arbolado. Los tonos azulados corresponden con las zonas donde más concentración de arbolado existe.

ALTURA MEDIA DEL ARBOLADO EN TAGARINA



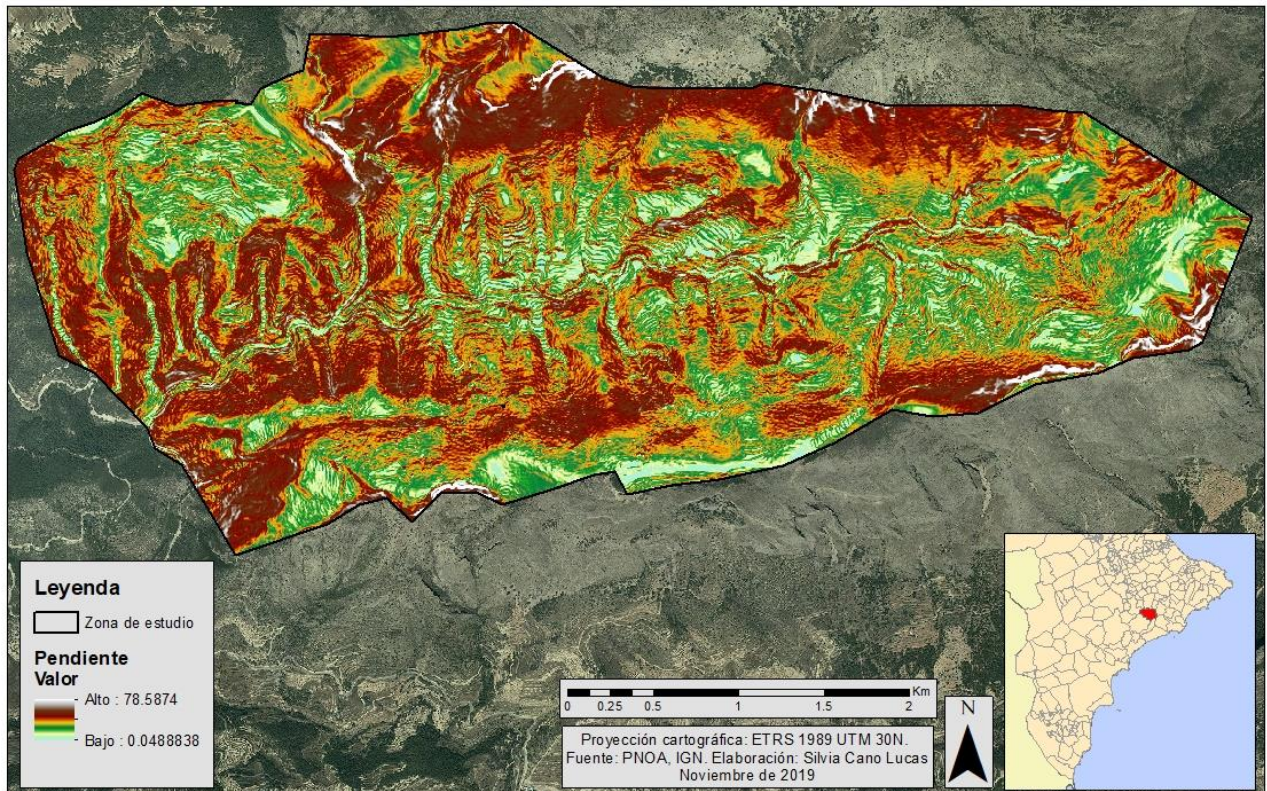
Anexo 2: Mapa de altura media del arbolado.

MAPA DE ORIENTACIONES EN EL BARRANCO DE TAGARINA



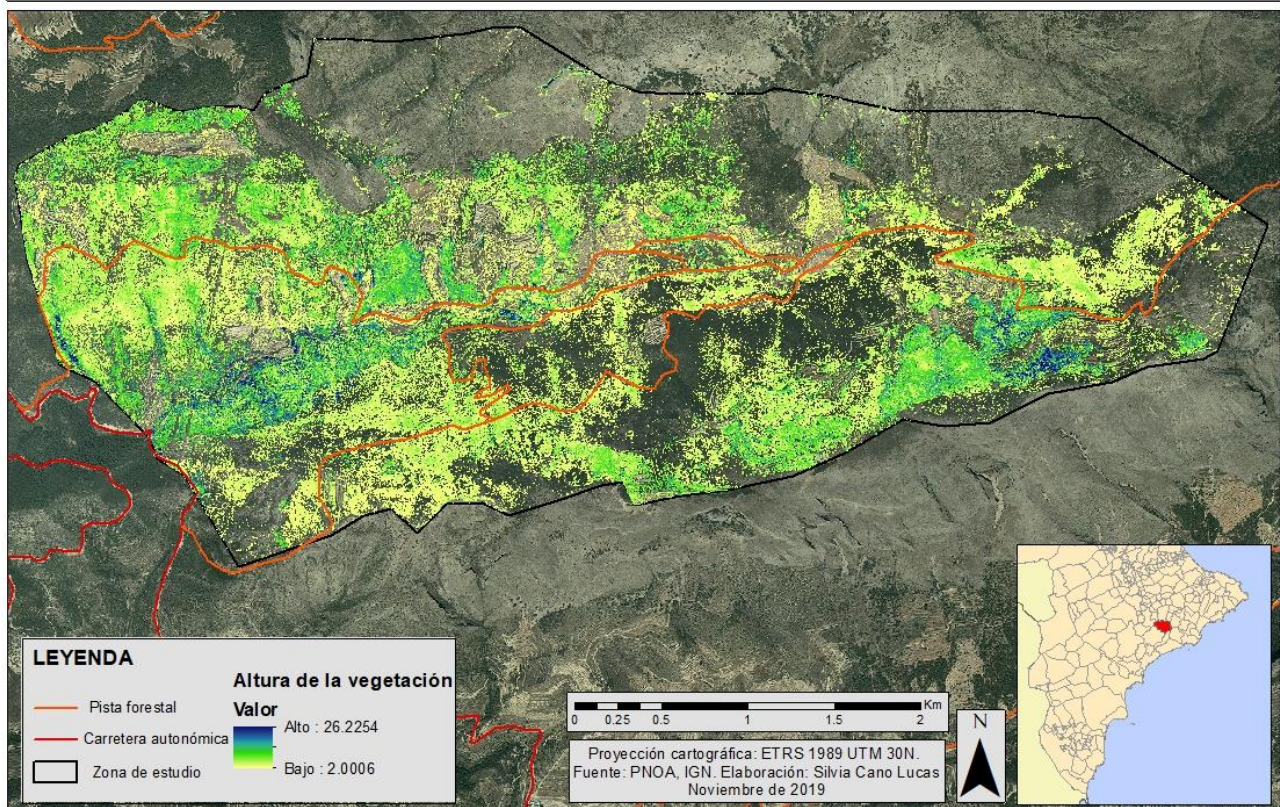
Anexo 3: Mapa de orientaciones en grados del Barranco de Tagarina.

PENDIENTES EN EL BARRANCO DE TAGARINA



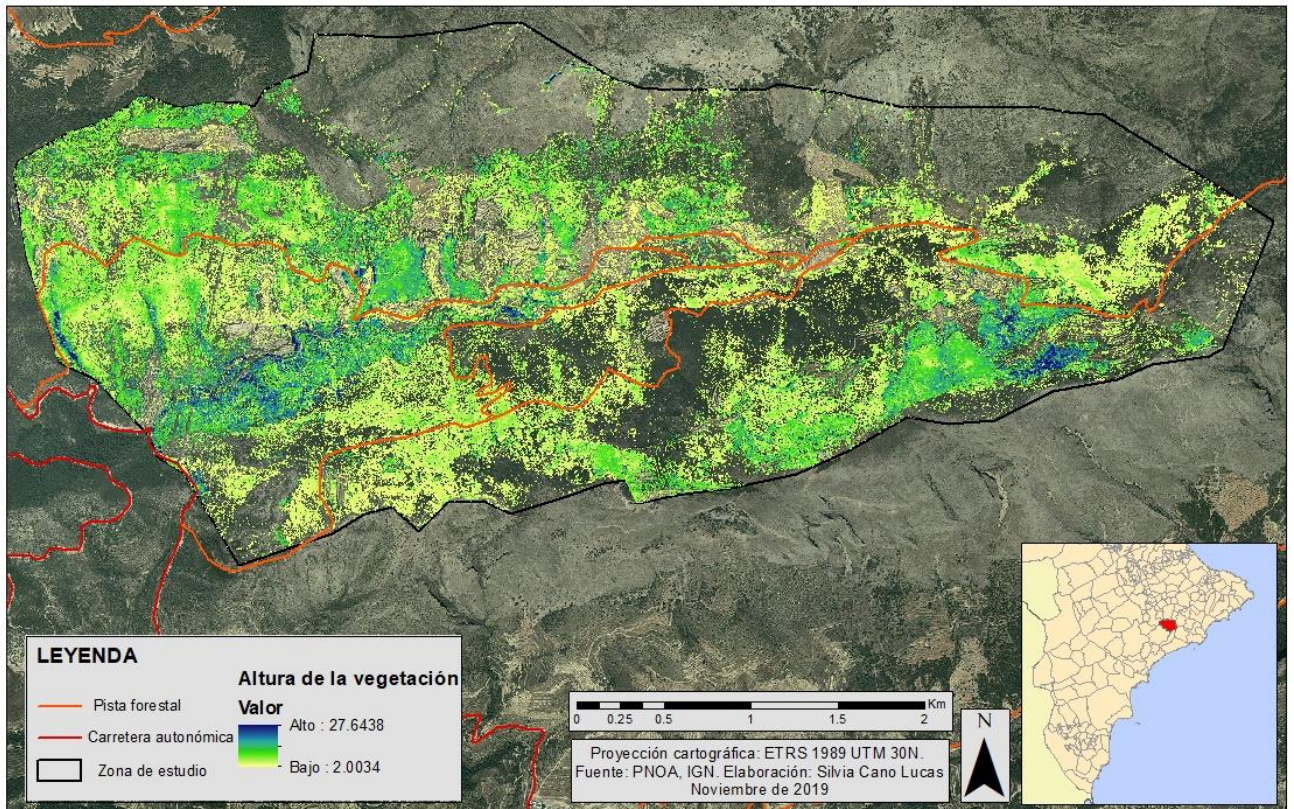
Anexo 4: Mapa de pendientes del barranco de Tagarina. Las zonas en color blanco y marrón oscuro se corresponden con las zonas donde más cambio de pendiente se produce.

PERCENTIL 10 DE ALTURA DE LA VEGETACIÓN



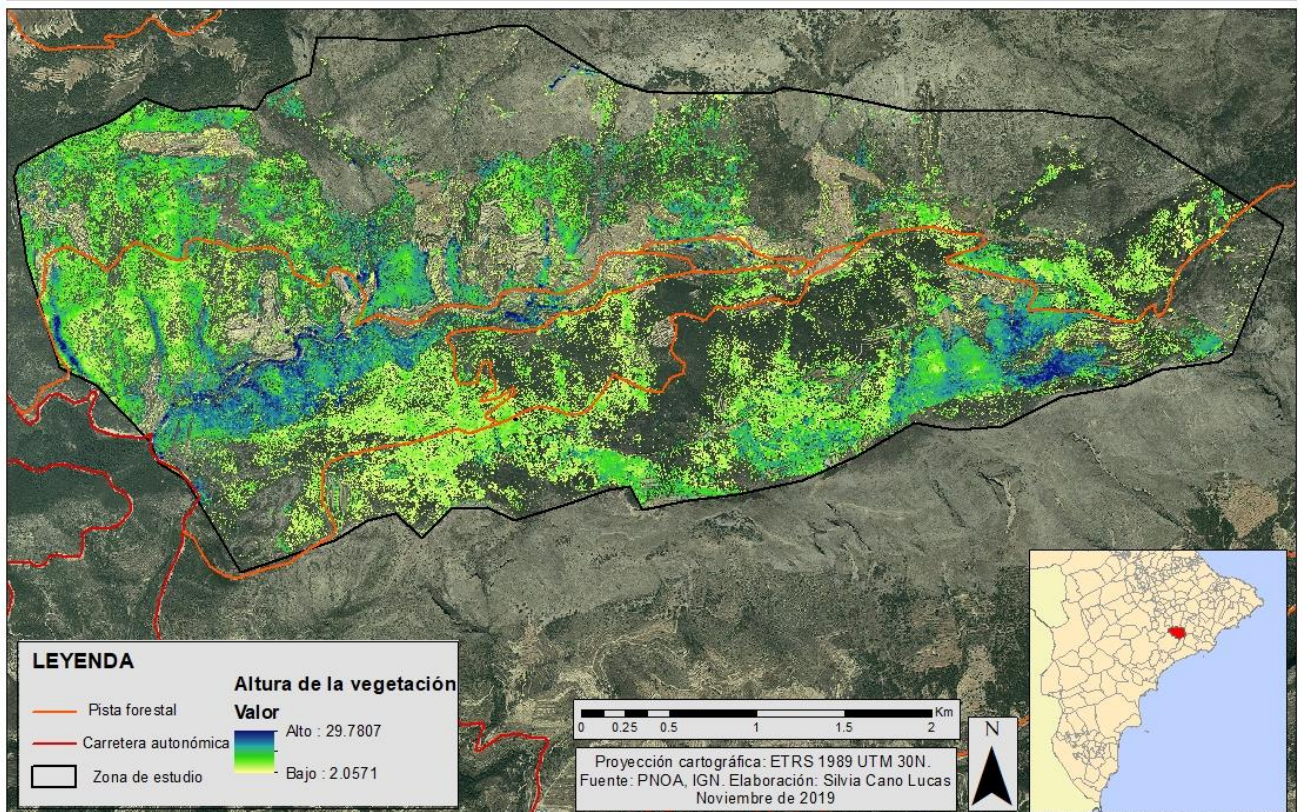
Anexo 5: Percentil de 10% de altura de la vegetación.

PERCENTIL 25 DE ALTURA DE LA VEGETACIÓN



Anexo 6: Mapa percentil 25 de altura de la vegetación.

PERCENTIL 90 DE ALTURA DE LA VEGETACIÓN



Anexo 7: Mapa percentil 90 de altura de la vegetación.