



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Modelado geoestadístico del combustible forestal
en paisajes de *Pinus halepensis* Mill.
mediante datos LiDAR y de campo

Geostatistical modeling of forest fuel in *Pinus
halepensis* Mill. landscapes using LiDAR and field data

Autor:

Raúl Hoffrén Mansoa

Directores:

Juan de la Riva Fernández
Darío Domingo Ruiz

Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio / Facultad de Filosofía y Letras
Junio de 2018

Agradecimientos

A los miembros del grupo GEOFOREST-IUCA, por la ayuda prestada durante determinadas fases del proyecto.

A Juan de la Riva, por depositar su confianza en que pudiera sacar este proyecto adelante.

Y, en especial, a Darío Domingo, por su ayuda y orientación durante la mayor parte del proceso de elaboración de este trabajo, desde las labores de campo hasta el tratamiento de los datos LiDAR y su posterior inclusión en el modelado estadístico; por su disposición en todo momento, su asesoramiento y supervisión, y por la facilidad con la que me ha transmitido los conocimientos que necesitaba para abordar la temática del proyecto.

Resumen

Los incendios forestales constituyen una de las perturbaciones más importantes de los paisajes mediterráneos, causando graves afecciones tanto en los ecosistemas como en las poblaciones. Por ello, es necesario conocer el comportamiento del fuego sobre una masa forestal. En este sentido, los modelos de combustible proporcionan una valiosa información sobre la propagación de un eventual incendio, así como sobre la cantidad de biomasa existente. El presente trabajo aborda una estimación de modelos de combustible *Prometheus* para tres áreas de la Península Ibérica afectadas por grandes incendios forestales en 1994, considerando la zona calcinada, en regeneración, y su entorno inmediato. Los métodos empleados se han apoyado en medios tradicionales, como la recopilación de datos en campo en parcelas experimentales de *Pinus halepensis* Mill., y en tecnologías de la información geográfica, mediante la creación e implementación de una base de datos para el almacenamiento de la información de campo, y el uso de los SIG y de datos de teledetección LiDAR. Ello ha permitido generar cartografías de combustibles forestales a través del modelado geoestadístico, considerando como variables independientes las procedentes del trabajo de campo y de los registros LiDAR; los mejores resultados se han obtenido mediante el modelo no paramétrico *Support Vector Machine* (*Accuracy coef.* 0,68). Tales resultados constituyen una herramienta poderosa para la gestión forestal y territorial.

Palabras clave: Combustibles forestales; Modelo geoestadístico; *Support Vector Machine*; LiDAR; *Pinus halepensis* Mill.; Paisajes mediterráneos; Gestión forestal.

Abstract

Forest fires are one of the most important disturbances in Mediterranean landscapes, causing serious effects on both ecosystems and populations. Therefore, it is necessary to know the behavior of the fire on a forest mass. Thus, the fuel models provide valuable information on the propagation of an eventual fire, as well as on the amount of existing biomass. This work deals with an estimate of *Prometheus* fuel models for three areas of the Iberian Peninsula affected by large forest fires in 1994, considering the burned area, in regeneration, and its immediate surroundings. The methods used have been supported by traditional means, such as field data collection in experimental plots of *Pinus halepensis* Mill., and in geographic information technologies, through the creation and implementation of a database for the storage of field information and the use of GIS and LiDAR remote sensing data. This has allowed the generation of cartographies of forest fuels through geostatistical modeling, considering as independent variables the ones coming from field work and LiDAR records; the best results were obtained using the non-parametric *Support Vector Machine* (*Accuracy coef.* 0,68). These results are a powerful tool for forest and territorial management.

Keywords: Forest fuels; Geostatistical modeling; *Support Vector Machine*; LiDAR; *Pinus halepensis* Mill.; Mediterranean landscapes; Forest management.

Índice general

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Los incendios forestales en los paisajes mediterráneos.....	1
1.1.2. Los modelos de combustible.....	2
1.1.3. La importancia de las tecnologías de la información geográfica como herramientas para el análisis de espacios forestales.....	3
1.2. Justificación del trabajo.....	4
1.3. Objetivos principales.....	5
2. Área de estudio.....	6
2.1. Los grandes incendios forestales de 1994.....	6
2.2. Caracterización y distribución del <i>Pinus halepensis</i> Mill.	7
2.3. Localización de los incendios de estudio.....	9
2.3.1. Incendio de Uncastillo (Zaragoza).....	9
2.3.2. Incendio de Villarluengo (Teruel).....	10
2.3.3. Incendio de Requena (Valencia).....	12
3. Materiales y métodos.....	13
3.1. Materiales.....	15
3.1.1. Instrumentos para las labores de campo.....	15
3.1.2. Base de datos relacional.....	15
3.1.3. Tecnología LiDAR.....	16
3.1.4. Otras herramientas utilizadas.....	18
3.2. Metodología.....	18
3.2.1. Recopilación de datos en campo.....	18
3.2.2. Diseño e implementación de la base de datos.....	21
3.2.3. Procesamiento de datos LiDAR.....	26
3.2.3.1. Descarga y comprobación de los datos LiDAR.....	26
3.2.3.2. Tratamiento de los datos LiDAR.....	27
3.2.4. Modelado estadístico.....	31
3.2.5. Espacialización y generación de cartografías.....	33
3.2.6. Dificultades surgidas durante el proceso metodológico.....	34
4. Resultados.....	36
4.1. Análisis de los datos de campo.....	36
4.2. Explotación de la base de datos.....	39
4.3. Análisis de las variables LiDAR.....	40
4.4. Modelado del combustible forestal.....	42
4.5. Representación cartográfica de modelos de combustible.....	43
5. Discusión.....	45
5.1. Valoración del proceso metodológico y de los resultados obtenidos.....	46
5.2. Extrapolación del modelo a otras especies.....	48
5.3. Utilidad de los mapas de combustibles para la gestión del territorio.....	48
5.4. Identificación de líneas futuras de trabajo.....	50
6. Conclusiones.....	50
7. Bibliografía.....	52
Anexos.....	55

Índice de Figuras

Figura 1.1.	Modelos de combustible <i>Prometheus</i>	3
Figura 2.1.	Evolución de los incendios forestales en España. Serie 1985-2014.....	7
Figura 2.2.	Distribución de <i>Pinus halepensis</i> Mill. y Regiones de Procedencia en España..	8
Figura 2.3.	Localización del incendio de Uncastillo.....	9
Figura 2.4.	Localización del incendio de Villarluego.....	11
Figura 2.5.	Localización del incendio de Requena.....	12
Figura 3.1.	Diagrama general de los métodos utilizados en el estudio.....	14
Figura 3.2.	Comparación de algunos modelos de bases de datos más frecuentes.....	16
Figura 3.3.	Evolución de la primera cobertura de datos LiDAR en España por el PNOA (2008-2015).....	17
Figura 3.4.	Detalle de las fichas utilizadas en el campo para la recopilación de la información.....	20
Figura 3.5.	Diagrama EAR general de la base de datos.....	24
Figura 3.6.	Esquema relacional de la base de datos.....	25
Figura 3.7.	Mallas LiDAR para cada uno de los tres incendios.....	27
Figura 3.8.	Nube de puntos del incendio de Uncastillo.....	28
Figura 3.9.	Generación de MDEs de Requena y Uncastillo a partir de información LiDAR.	29
Figura 3.10.	Detalle de la nube de puntos recortada a dos parcelas experimentales.....	30
Figura 3.11.	Diagrama de la extracción de los estadísticos LiDAR para su espacialización..	33
Figura 4.1.	Diagramas de caja de las variables independientes obtenidas en campo.....	38
Figura 4.2.	Relación entre el número de parcelas y el de los datos de campo introducidos.....	39
Figura 4.3.	Diagramas de caja de variables LiDAR.....	41
Figura 4.4.	Mapa de modelos de combustible en el incendio de Uncastillo.....	43
Figura 4.5.	Mapa de modelos de combustible en el incendio de Villarluego.....	44
Figura 4.5.	Mapa de modelos de combustible en el incendio de Requena.....	45

Índice de Tablas

Tabla 3.1.	Número de parcelas experimentales totales y por incendio.....	19
Tabla 3.2.	Estructura de la tabla "GENERAL".....	22
Tabla 3.3.	Estructura de la tabla "FLORISTICO".....	23
Tabla 3.4.	Estructura de la tabla "ARBOLES".....	23
Tabla 3.5.	Estructura de la tabla "REGENERADO".....	23
Tabla 3.6.	Clases predefinidas de los datos LiDAR del PNOA.....	26
Tabla 4.1.	Modelos de combustible asignados en campo a cada parcela experimental...	36
Tabla 4.2.	Cantidad de parcelas por cada tipo de modelo de combustible.....	36
Tabla 4.3.	Estadísticas básicas de las variables de campo (selección).....	37
Tabla 4.4.	Cantidad total de datos de campo introducidos en la base de datos.....	39
Tabla 4.5.	Estadísticas básicas de las variables LiDAR (selección).....	40
Tabla 4.6.	Matriz de confusión de los modelos de combustible.....	42
Tabla 4.7.	Resultados de la predicción de los modelos.....	42

1. Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Los incendios forestales en los paisajes mediterráneos

Los incendios forestales constituyen uno de los peligros naturales más extendidos y de mayores consecuencias ambientales en todo el mundo. Se producen por la combustión de la vegetación a partir de un fuego originado por causas naturales o humanas (Plana *et al.*, 2016), condicionando la existencia y distribución de los bosques en el transcurso de miles de años (Vélez, 1993). En un ecosistema determinado existe un régimen de incendios, al igual que se producen otros tipos de regímenes naturales (García Hernández, 2014), con periodos de retorno, frecuencia e intensidad variables. En estos espacios, los factores desencadenantes de origen natural son la climatología y el tipo de vegetación existente, adaptada no obstante a estas circunstancias (Plana *et al.*, 2007), sin necesidad de que exista una intervención antrópica (Pausas y Vallejo, 2008). Además, pueden existir factores intensificadores como la topografía, la orientación, los suelos o las prácticas humanas accidentales o intencionadas. El fuego tiene un importante papel en los procesos que gestionan el Sistema Tierra (Bodí *et al.*, 2012) convirtiendo a los incendios forestales en un elemento de transformación ambiental al modificar la composición y estructura de las formaciones vegetales, transformar el paisaje y desempeñar un papel clave en el cambio climático por las emisiones de gases a la atmósfera (Martínez-Vega y Martín-Isabel, 2010).

Este fenómeno alcanza las máximas intensidades en las regiones mediterráneas, causando graves afecciones sobre la cubierta vegetal arbolada (Plana *et al.*, 2016) e importantes efectos ambientales negativos como la degradación edáfica, la pérdida de materia orgánica y de biodiversidad y la intensificación de los procesos erosivos que puede conllevar a la desertificación de un territorio. El clima mediterráneo se presenta en latitudes medias, generalmente entre los 30° y 40° de latitud en ambos hemisferios, aunque alcanza los 45° en la Europa mediterránea (sur de Francia). Se trata de un clima de transición entre el templado húmedo de las costas occidentales y el subtropical seco y estepario, apareciendo en cinco puntos del planeta: el Mar Mediterráneo, California, Chile, Sudáfrica y el sudoeste de Australia. La disposición paralela y próxima a la costa de las cadenas montañosas en la Europa meridional limita la extensión de este clima hacia zonas continentales excepto en los casos de la Península Ibérica y de Anatolia, en los que penetra hacia el interior presentando un matiz más contrastado (continentalizado). Se caracteriza por diversos factores: i) la abundante insolación anual, sobre todo en las zonas más meridionales (Font, 2000); ii) las escasas e irregulares precipitaciones estacionales e interanuales, con máximos en la primavera y el otoño y muy escasas durante el verano, no superando generalmente los 1.000 mm/año (Franco, 2007); iii) las variaciones térmicas diarias y anuales, con inviernos fríos y veranos cálidos; iv) la sequía estival, resultado de la escasez de lluvias, de las altas temperaturas y de la elevada evapotranspiración en el ambiente, y; v) por tormentas de tipo convectivo, especialmente durante los meses centrales del año, las cuales pueden ir acompañadas de aparato eléctrico como rayos que incrementan el riesgo de incendio. La vegetación que acompaña este clima se caracteriza por su adaptación a la sequía estival, con predominancia de especies xerófilas con troncos cortos, corteza gruesa y raíces profundas que penetran en el suelo en busca de agua, y hojas pequeñas, fuertes y de carácter perennifolias.

1.1.2. Los modelos de combustible

El fuego es un elemento natural modelador de los ecosistemas forestales y determinante para entender globalmente la distribución y evolución de los sistemas vegetales sobre la Tierra (Martínez-Vega y Martín-Isabel, 2010). El combustible es uno de los tres elementos que constituyen el llamado *triángulo de fuego*, junto con la fuente de calor y el oxígeno. En los incendios forestales, la fuente de calor puede provenir de elementos naturales, como los rayos, o de elementos antrópicos debido a negligencias de los propios humanos como el abandono de vidrios, colillas o determinadas prácticas agrarias. Por su parte, el oxígeno es proporcionado por la atmósfera, mientras que los combustibles forestales representan toda la materia orgánica que se encuentra en el medio natural y que está disponible para la combustión (Morfin-Ríos *et al.*, 2012), tanto materia viva (matorral, arbustos, árboles, ramas o raíces) como muerta (tocones o troncos). El alto potencial ignífugo se produce cuando este material se encuentra seco; por ello, los ambientes más propensos a sufrir este tipo de perturbaciones son los mediterráneos. En un incendio forestal, el fuego puede propagarse de diferente manera en función de la distribución de la vegetación en un espacio, es decir, del modelo de combustible existente. Esta propagación puede producirse a partir del subsuelo, superficial o de copas, siendo estos últimos los más peligrosos por su mayor velocidad en la propagación y la dificultad de su extinción.

En este contexto, los modelos de combustible constituyen uno de los elementos clave para explicar el comportamiento del fuego en los incendios forestales (Fernández Alonso, 2016). Tienen como finalidad estimar cómo será la propagación de un incendio sobre una masa forestal de manera simplificada, ya que existe una gran diversidad de factores que influyen en la combustibilidad de una especie vegetal. Durante las últimas décadas, se han desarrollado diferentes tipos de modelos de combustible, siendo los más conocidos los propuestos por Rothermel (1972) y Albini (1976) y que se han aplicado, fundamentalmente, en los Estados Unidos. Estos modelos establecen 13 tipologías de combustibilidad agrupados en 4 grandes categorías en función del elemento estructural de mayor importancia en la propagación del fuego: en los modelos 1 a 3 son los pastos, en los modelos 4 a 7 los matorrales, en los modelos 8 a 9 la hojarasca bajo el arbolado y en los modelos 10 a 13 el residuo de la corta. En 1990, el ICONA realizó un inventario fotográfico de situaciones representativas de combustibles en las regiones españolas (Fernández Alonso, 2016). Años más tarde, el proyecto europeo *Prometheus* (2000) adaptó los modelos de Rothermel y Albini con el fin de caracterizar la combustibilidad de la vegetación mediterránea y adecuarlos, además, a procesos de elaboración basados en la información derivada de la teledetección. Como resultado, se establecieron siete categorías en función del tipo y de la altura del elemento responsable de la propagación, divididos en tres grandes grupos:

- Modelo de propagación en herbáceas:
 - **Modelo 1:** Cubrimiento de herbáceas superior al 50%. Esta categoría comprende los pastizales tanto de uso agrícola como naturales.

- Modelos de propagación en matorrales y estratos arbustivos. El cubrimiento arbustivo es superior al 60% y el arbóreo inferior al 50%:
 - **Modelo 2:** Pastizales, matorrales y estratos subarbustivos menores de 0,60 metros de altura y un alto porcentaje de hierba.
 - **Modelo 3:** Pastizales, matorrales y estratos subarbustivos y arbustivos entre 0,60 y 2 metros de altura, así como árboles resultado de procesos de regeneración vegetal post-incendio o artificial.

- **Modelo 4:** Comprende estratos arbustivos entre 2 y 4 metros de altura y árboles procedentes del regenerado.
- Modelos de propagación en árboles. El cubrimiento arbustivo es inferior al 30% y el arbóreo superior al 50%:
 - **Modelo 5:** Arbolado sin apenas estratos arbustivos, subarbustivos ni herbáceas.
 - **Modelo 6:** Arbolado con estratos arbustivos pero con diferencias de altura entre éstos y las copas de los árboles (más de 0,5 m).
 - **Modelo 7:** Arbolado con estratos arbustivos sin diferencias de altura entre éstos y las copas de los árboles (menos de 0,5 m).

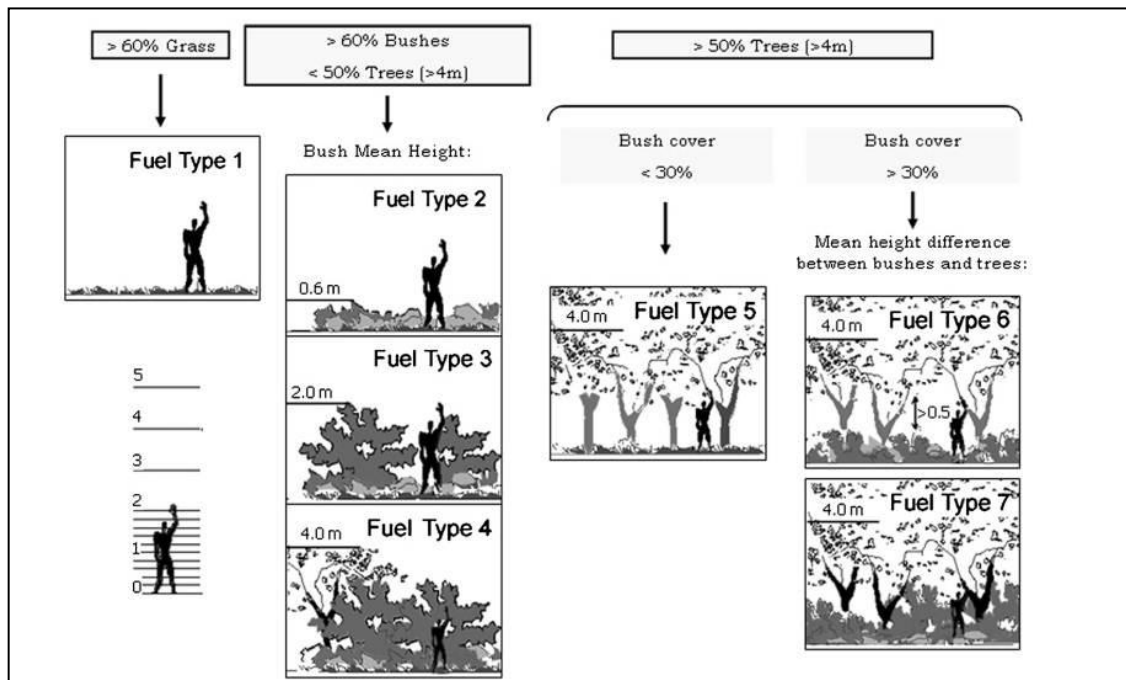


Fig. 1.1. Modelos de combustible Prometheus. Fuente: Arroyo et al. (2006)

En síntesis, los modelos de combustibles proporcionan una valiosa información de la propagación del incendio sobre una masa forestal. La estimación de esta variable se ha apoyado en labores de campo en parcelas experimentales y en el uso de las nuevas tecnologías de la información geográfica, adquiriendo una gran importancia los SIG y la teledetección al respecto. Este trabajo se ha orientado hacia los modelos *Prometheus*, por su adaptación a los ambientes mediterráneos y a las tecnologías de la información geográfica.

1.1.3. La importancia de las tecnologías de la información geográfica como herramientas para el análisis de espacios forestales

Durante los años 1990, algunos de los países más desarrollados comenzaron a incorporar de manera relevante las nuevas tecnologías en la lucha contra los incendios forestales, como el empleo de satélites del programa NOAA para el seguimiento de la vegetación y de los espacios incendiados mediante la teledetección. A finales de esta década, Sánchez et al. (1999) ya manifestó la importancia de los SIG como una herramienta de trabajo clave para la gestión de los recursos forestales al constituir un sistema único capaz de integrar los datos reales presentes, las previsiones futuras y, en algunos casos, las experiencias pasadas. Según Chuvieco (2008), los SIG facilitan múltiples operaciones de difícil accesibilidad por medios

convencionales como la generalización cartográfica, la integración de variables espaciales o el modelado del relieve, entre otros. Asimismo, este autor afirma que la posibilidad de almacenar la información espacial de forma eficiente permite simplificar su actualización y el acceso directo al usuario, incrementando las posibilidades de análisis que ofrecen los medios tradicionales. En el ámbito forestal, los SIG facultan la elaboración de inventarios forestales a partir de ortofotografías y/o imágenes de satélite o mediante la recopilación de datos en campo y la posterior generación de cartografías asociadas. Asimismo, facilitan la ordenación y gestión de los recursos forestales, permitiendo realizar modelos de simulación ante determinados eventos naturales, facilitando un mejor aprovechamiento de los recursos forestales o guiando tareas de restauración de los bosques, dado que permiten estimar el grado de afección de la deforestación existente.

Junto con los SIG, una de las herramientas más provechosas para la gestión de los bosques desde hace décadas es la teledetección. Se trata de un instrumento de análisis aéreo y satelital diseñado para la observación de la Tierra, lo que la convierte en una herramienta puramente geográfica y que, junto con los SIG, suponen un apoyo muy valioso para los análisis geográficos (de la Riva, 1997). Los satélites de observación de nuestro planeta ofrecen condiciones óptimas para este tipo de estudios forestales, destacando su cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre, la perspectiva panorámica, la observación multiescala, la información sobre regiones no visibles del espectro y la periodicidad de sus órbitas (Chuvienco, 2008). La teledetección se diferencia entre los sensores remotos pasivos, que son los que se limitan a recibir los pulsos procedentes de un foco exterior a ellos, y los activos, que son los capaces de emitir sus propios pulsos.

En este último grupo se ubica la tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*), basada en la emisión de pulsos láser desde un sensor y la estimación del tiempo que transcurre hasta que dicho pulso interacciona con la superficie terrestre y retorna de nuevo al sensor, dando como resultado una nube de puntos georreferenciada. Por lo general, estos datos se toman mediante un escáner láser aerotransportado (ALS) en vehículos aéreos no tripulados (drones), aviones o helicópteros, desde donde se envía la señal láser hacia el objetivo siguiendo rutas preestablecidas. Suelen llevar incorporados receptores GPS para conocer las coordenadas (x, y) y la altura (z) del vehículo emisor. El reflejo del láser sobre la superficie del objetivo es detectado por los receptores del ALS, permitiendo conocer la distancia existente entre ambos. Al combinar esta información con la posición GPS, se obtienen puntos tridimensionales que representan la superficie del objeto reflejado. Según Ramírez Cisneros *et al.* (2013), el LiDAR representa una fuente de datos muy potente para el estudio de la estructura de la vegetación, lo que enlaza perfectamente con la idea de la generación de cartografía de modelos de combustible.

1.2. Justificación del trabajo

Los bosques se caracterizan por ser multifuncionales, ya que cumplen fines económicos, sociales y medioambientales (Comisión Europea, 2013). En este sentido, los incendios forestales provocan importantes afecciones a escala local o regional, planteando la necesidad de recurrir a estudios territoriales orientados a la prevención y protección, tanto de los ecosistemas forestales como de las poblaciones que habitan los espacios rurales. Además, en el contexto del cambio climático, es posible que en el futuro las condiciones ecológicas de determinadas zonas adquieran características climáticas mediterráneas, por lo que la problemática del fuego puede aumentar en extensión (Biro, 2009). Asimismo, en los últimos tiempos se han producido ciertas alteraciones en los regímenes naturales de los incendios

debido a los recientes cambios de uso del suelo y gestión del paisaje, produciendo incendios más destructivos (Pausas y Vallejo, 2008). A diferencia de otros peligros naturales, los incendios forestales son uno de los más predecibles (Biro, 2009). Por todo ello, en este escenario de intensificación de la peligrosidad, los estudios se hacen más necesarios que nunca, ya que sólo a través del conocimiento del territorio y de los factores que determinan el comportamiento del fuego se podrá realizar una gestión adecuada y eficiente de los bosques.

Los incendios forestales constituyen un hecho geográfico, en tanto que forman parte de los factores que modelan los ecosistemas mediterráneos, y esta es la perspectiva que se le ha querido dar al presente estudio. Se ha centrado en la estimación de los modelos de combustible *Prometheus* en función de la estructura y biomasa vegetal existente, con el fin de proporcionar información de utilidad que pueda ser empleada para predecir la extensión y la intensidad de los incendios, puesto que estos modelos de combustible permiten estimar cómo actuará dicha masa forestal en caso de incendio. La plasmación de los resultados en documentos cartográficos, a partir de los SIG y de la teledetección, permite mostrar la distribución espacial de estos modelos 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 prestada en el grupo de investigación *Procesos Geoambientales en Espacios Forestales (GEOFOREST)* perteneciente al Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA) de la Universidad de Zaragoza, dentro del proyecto SERGISAT (CGL 2014-57013-C2). Dicho proyecto se enmarca entre los retos establecidos por la Unión Europea, en su *Estrategia Europa 2020*, referente a las acciones que, en el sector del medio ambiente y del clima, se orientan hacia el análisis de las causas y los cambios en ecosistemas y biodiversidad. La participación en el grupo y en el proyecto SERGISAT ha sido posible gracias a la concesión de una "beca de colaboración" del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España.

1.3. Objetivos principales

El objetivo general del presente estudio es la elaboración de cartografía de los combustibles forestales mediante el modelado geoestadístico de datos de campo y de LiDAR. Se parte, por tanto, de la hipótesis de que las nubes de puntos LiDAR, al aportar información precisa sobre la estructura vertical de la vegetación, permiten estimar el modelo de combustible a partir de métricas de distribución por estratos y de la variabilidad de los retornos.

Lo anterior implica, como objetivos secundarios:

- La caracterización de los modelos de combustible *Prometheus* en campo, por cuanto más adaptados a los medios forestales mediterráneos, y su parametrización mediante métricas LiDAR.
- La definición de una metodología, bastante novedosa en el contexto de la bibliografía especializada, adecuada a la naturaleza cualitativa de los modelos combustibles y a la no-normalidad de los datos LiDAR y de campo, que se base en modelos no paramétricos.

A estos objetivos, de naturaleza técnico-metodológica, se suma el relativo a contribuir mediante los modelos y la cartografía generados a una gestión más eficiente de los medios forestales y del territorio en general.

2. Ámbito de estudio

El trabajo se ha centrado en tres áreas afectadas por grandes incendios forestales en 1994. Concretamente, se trata de los incendios de Uncastillo, en la provincia de Zaragoza; Villarluengo, en la provincia de Teruel; y Requena, en la provincia de Valencia. En dichos incendios se muestrearon las distintas formaciones vegetales mediante un conjunto de 73 parcelas experimentales. El presente estudio analiza las formaciones de *Pinus halepensis* Mill. dado que son las masas forestales más afectadas por grandes incendios forestales en el ámbito mediterráneo en parte debido a su elevada combustibilidad.

2.1. Los grandes incendios forestales de 1994

El año 1994 se caracterizó por ser especialmente virulento en cuanto a las hectáreas forestales incendiadas en España, estando precedido por un incremento progresivo en el número de incendios forestales en los años anteriores. Son varios los estudios que coinciden en este aumento en la Europa mediterránea, siendo diversos los factores que han propiciado esta situación. En la Península Ibérica existen datos cuantitativos desde 1960 sobre el número de incendios forestales que permiten evaluar su evolución hasta el presente (Vallejo *et al.*, 2004). Los resultados demuestran que en zonas como el levante español, los incendios forestales han aumentado de forma exponencial durante las últimas décadas (Pausas, 2004) así como la superficie forestal incendiada desde los años 1970 (Vallejo *et al.*, 2004). Este incremento se ha observado a pesar del aumento paralelo que se ha realizado en el esfuerzo de su extinción (Vallejo *et al.*, 2004). Entre los factores que han propiciado este incremento se pueden nombrar a aquellos de componente natural y a los de tipo socioeconómico. Los primeros se refieren a los regímenes climáticos y a la estrecha relación de los incendios forestales con el clima mediterráneo, así como al probable aumento en extensión de estas afecciones debido al cambio climático. Por otro lado, se encuentran los factores socioeconómicos referidos al éxodo rural de la segunda mitad del siglo XX, que propició el abandono del campo y la falta de cuidado de los bosques, propiciando la acumulación de biomasa vegetal o material combustible que favorece la propagación del fuego. Asimismo, destaca la creciente importancia del turismo y el incremento de las edificaciones en la interfase urbano forestal y en espacios rurales colindantes con masas forestales, que se constituyen como otro de los factores más relevantes de este incremento (Martínez-Vega y Martín-Isabel, 2010).

En 1994 se quemaron 427.635 hectáreas en España, de las cuales un 76,63% fueron grandes incendios forestales (MMA, 2002), entendiéndose como tales aquellos superiores a las 500 has. El factor desencadenante principal fue la extrema sequía vivida en gran parte del territorio, especialmente en el arco mediterráneo español. Algunas de las áreas forestales más afectadas fueron las de Nonaspe y Uncastillo, en Zaragoza; Montmajor, en Tarragona; Villarluengo, en Teruel; Espadilla, en Castellón; Fontanares, Miralles y Requena, en Valencia; San Martín de Boniches, en Cuenca, Moratalla, en Murcia; o Yeste, en Albacete. La inmensa mayoría de estos y otros incendios acontecidos aquel año se originaron entre los meses más secos (junio-octubre) debido a la combinación de la escasez de agua y las altas temperaturas, y a otros factores intensificadores como la propia acción antrópica. El presente estudio analiza tres de estos grandes incendios (Uncastillo, Villarluengo y Requena), no sólo por la amplia extensión de terreno que fue afectada sino porque las más de dos décadas transcurridas desde entonces resultan idóneas para la exploración y el estudio de la regeneración de la vegetación y el análisis de la componente estructural de la misma.

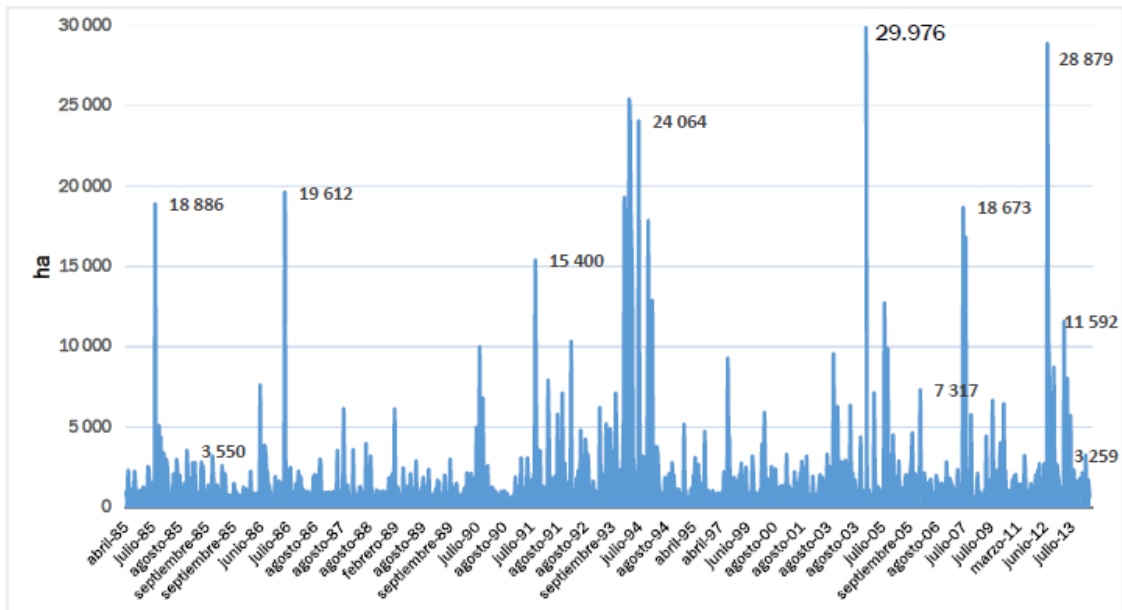


Fig. 2.1. Evolución de los incendios forestales en España. Serie 1985-2014. Fuente: López Santalla *et al.* (2017)

2.2. Caracterización y distribución del *Pinus halepensis* Mill.

El pino carrasco (nombre científico: *Pinus halepensis*) es la especie de pino más típicamente mediterránea (Alía *et al.*, 2009), extendiéndose fundamentalmente por el Mediterráneo occidental, concretamente en la Península Ibérica y en las regiones mediterráneas de los países del Magreb (Cabanillas, 2010). En Europa también podemos encontrarlo en el sureste de Francia, Italia, Malta, Croacia, Albania y Grecia, y es posible localizar algunos agrupamientos en países del Oriente Medio como Jordania, Israel, Líbano, Turquía y Siria, país este último de donde procede el nombre científico de la especie: Alepo. El trabajo se ha centrado en esta especie por ser una de las más características de los ambientes mediterráneos, sobre todo en la Península Ibérica, y por su carácter pirófito dada a su elevada combustibilidad.

Se trata de un árbol de porte mediano que puede alcanzar los 20-22 m de altura y sólo en condiciones muy favorables alcanza los 30 m (Alía *et al.*, 2009), con troncos de corteza gris clara y copas irregulares que se abren hacia los 20 años. Es una especie germinadora muy prolífica en la producción de semillas, comenzando a edades muy tempranas (Cabanillas, 2010), normalmente durante el segundo año (Puértolas, 2012) a través de las piñas, siendo óptima esta producción entre los 15 y 20 años. Cuenta con una gran capacidad de colonización inicial del suelo en relación a otras especies mediterráneas (Puértolas *et al.*, 2012) pero su ciclo de vida es corto debido a su elevada inflamabilidad por su alto contenido en resina y a la ausencia de poda natural que favorece la acumulación de necromasa en el suelo. Ello propicia el aumento de fuegos en copa (Cabanillas, 2010) que, según los modelos de combustible *Prometheus*, serían de tipo 6 y 7, es decir, los de mayor velocidad de propagación del fuego. Debido a esta elevada combustibilidad, el *Pinus halepensis* ha adoptado varias estrategias al mismo, como el cerramiento que presentan algunas piñas durante los primeros años para no permitir la producción de semillas (Puértolas *et al.*, 2012) o la dispersión de las mismas al abrirse las piñas por las altas temperaturas de un incendio (Cabanillas, 2010) que serán las que permitan la germinación de nuevos individuos tras el suceso.

Pinus halepensis es una especie heliófila, termófila y xerófila, adaptada a la sequía y a la aridez pero no así a las heladas, ya que aproximadamente a -12°C se producen daños en las acículas endurecidas (Puértolas *et al.*, 2012) lo que explica su distribución por el ámbito mediterráneo y, dentro de éste, en zonas no muy alejadas del mar, ya que son espacios que pueden sufrir sequías estivales pero donde es muy poco probable la incidencia de periodos fríos típicos de los climas mediterráneos más continentalizados. La especie puede llegar a soportar 250 mm de precipitación anual y periodos secos estivales de 1 a 5 meses (Cabanillas, 2010). En este contexto, el área potencial y la distribución actual de las masas forestales de pino carrasco en la Península Ibérica se localiza en el arco levantino, desde la provincia de Málaga hasta la de Gerona. No obstante, existen importantes masas en zonas del interior peninsular poco afectadas por las heladas (Alía *et al.*, 2009) como en las Béticas orientales, en el este de Albacete y Cuenca, en el centro-este de Aragón y en el valle del Ebro hasta Álava (Herranz, 2000), estos últimos sobre laderas de relieves tabulares o en zonas menos expuestas a las inversiones térmicas invernales. Suele disponerse en las pendientes de solana por la mayor cantidad de insolación recibida y en niveles altimétricos que, por lo general, no superan los 800 msnm (Cabanillas, 2010), aunque pueden ubicarse en altitudes mayores si las condiciones climáticas son óptimas para su desarrollo. En España, la superficie del *Pinus halepensis* es de 19.585 km² y el área potencial se estima en 70.330 km² (MAPAMA, 2011). Se ubican mayoritariamente en suelos calizos de pH elevado (básicos) aunque puede hacerlo también sobre sustratos silíceos ácidos (Herranz, 2000). Abundan en grandes pendientes gracias a su rápido crecimiento fisiológico en comparación con otras especies, su adaptación a la escasez de agua y la mayor resistencia a la insolación (Puértolas *et al.*, 2012).

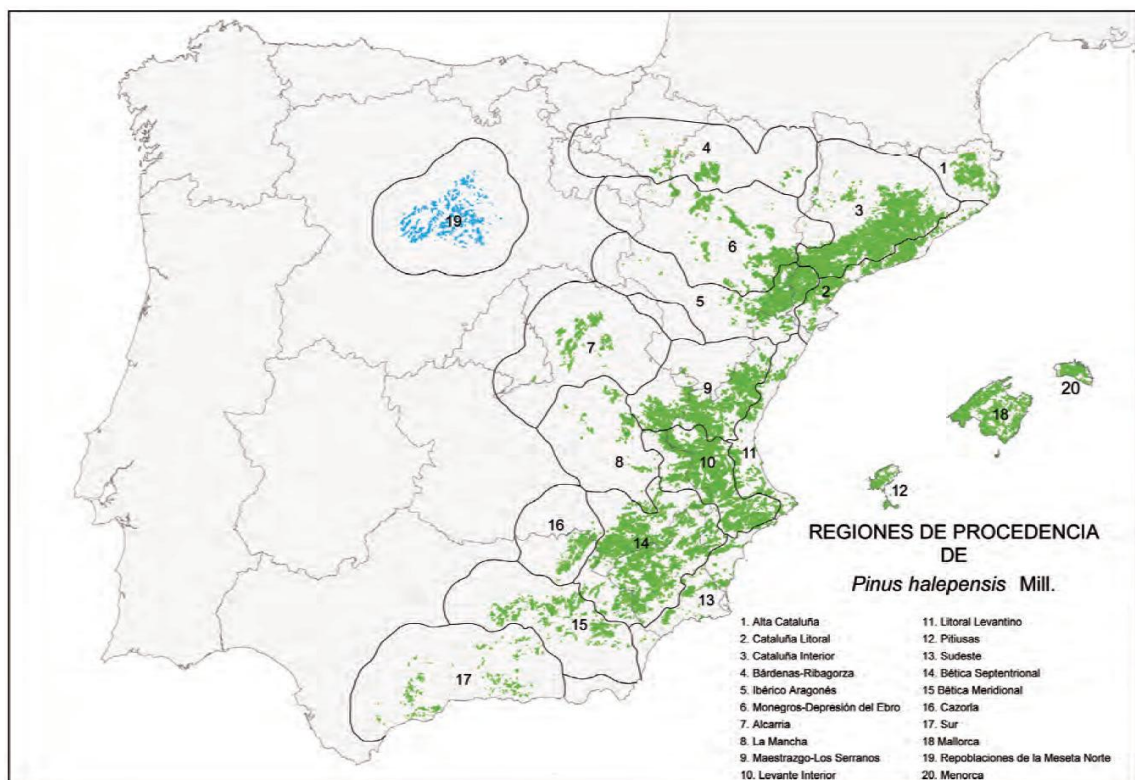


Fig. 2.2. Distribución de *Pinus halepensis* Mill. y Regiones de Procedencia en España. Fuente: Alía *et al.* (2009)

Alía *et al.* (2009) establece 20 Regiones de procedencia del *Pinus halepensis* divididos en siete grandes grupos: Regiones mediterráneas marítimas cálidas subsecas, Región mediterránea marítima cálida y seca, Regiones submediterráneas cálidas subsecas, Regiones submediterráneas cálidas secas, Regiones submediterráneas continentales frías, Regiones

templadas subhúmedas y Región mediterránea templada húmeda. Las diferencias entre ellas radican en las condiciones climáticas del territorio, como su régimen de precipitaciones y de temperaturas, que influirán, además, en el tipo de suelos sobre los que se asiente la especie. En nuestro ámbito de estudio, las masas de pino carrasco se reducen a una sola de estas agrupaciones: las Regiones submediterráneas cálidas subsecas, integradas por las regiones de Cataluña Interior, Bardenas-Ribagorza, Ibérico Aragonés, Maestrazgo-Los Serranos y Levante Interior. Se trata de zonas alejadas de la influencia marítima que propicia un matiz ligeramente continental, con mayores contrastes térmicos diarios y estacionales y la posibilidad de que se produzcan algunas heladas nocturnas en invierno. El régimen de precipitaciones se sitúa en torno a los 500-600 mm/año y se asientan, fundamentalmente, sobre sustratos básicos bastante carbonatados.

2.3. Localización de los incendios de estudio

2.3.1. Incendio de Uncastillo (Zaragoza)

El origen del incendio se debió a una tormenta eléctrica ocurrida el 17 de julio de 1994. Se extendió por las laderas de solana de la Sierras Exteriores del Prepirineo, en la parte noroccidental de la comarca de las Cinco Villas, penetrando algún sector en la comarca navarra de Sangüesa. Estuvo focalizado entre Sos del Rey Católico, al norte; Sofuentes, al oeste y Castiliscar al sur y Uncastillo al este, a lo largo de 7.899 has. Las parcelas experimentales se encuentran ubicadas en el sector de *Pinus halepensis* cercano a Castiliscar y en otra zona más septentrional. Esta especie se presenta en el área incendiada por 998 has, representando el 12,6% del total.

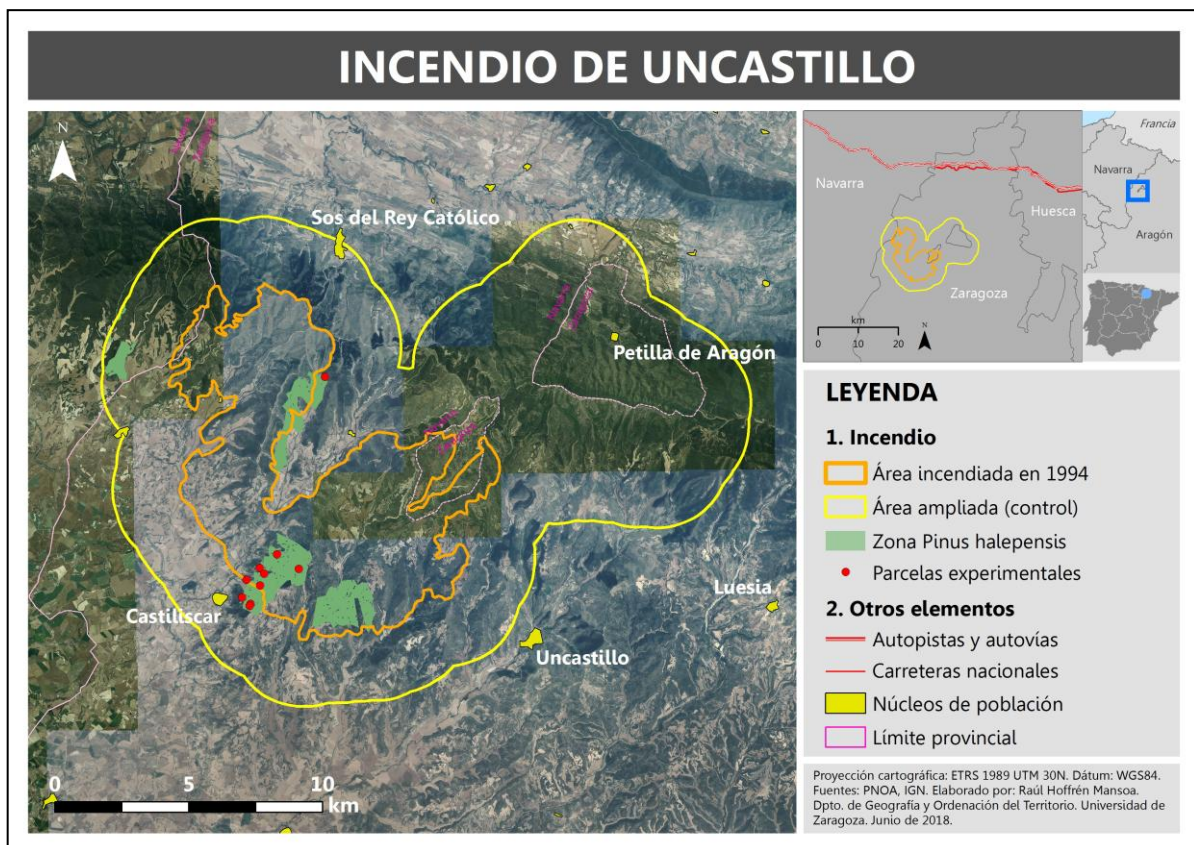


Fig. 2.3. Localización del incendio de Uncastillo

El área se localiza fundamentalmente sobre relieves subhorizontales en materiales detríticos de edad oligocena-miocena, existiendo otras morfologías como terrazas fluviales y glaciares de edades pleistocenas medias y bajas, y cuaternarias (holocenas). Las unidades geomorfológicas más representativas son la Sierra de Santo Domingo (1.517 m), un anticlinal localizado en las Sierras Exteriores que separa la Val de Onsella (norte) del Somontano Pirenaico (sur) y que se localiza en el sector central y septentrional del área incendiada. El sector más meridional se ubica en el Somontano Pirenaico, formado en su mayoría por materiales detríticos, con escaso buzamiento y ligeramente inclinado hacia el sur. Presenta clima mediterráneo levemente continentalizado e influido por las corrientes oceánicas debido a su relativa cercanía al sector cantábrico, que permiten elevar las precipitaciones medias anuales hasta los 600 mm (Atlas Climático de Aragón, 2009). Se trataría, por tanto, de un clima Csa, según Köppen, del grupo de climas templados con veranos secos y cálidos, o de un clima de transición mediterráneo-oceánico, según la clasificación realizada por Cuadrat *et al.* (2009) para el Atlas Climático de Aragón. El área forma parte de la cuenca hidrográfica de los Arbas, formado por el Arba de Biel, de Luesia y de Riguel, afluentes todos ellos del río Ebro, aunque parte del sector más septentrional pertenecería a la cuenca del Aragón. La ubicación de las cabeceras en las Sierras Exteriores y el régimen climático existente propician que los caudales de estos ríos sean relativamente escasos e irregulares, sobre todo si los comparamos con otros afluentes aragoneses de la margen izquierda. Por su parte, los usos del suelo según el proyecto *Corine Land Cover* (CLC) están dominados por áreas agrícolas, fundamentalmente de secano, de cultivos cerealísticos y algunos frutales; y por zonas forestales de bosques mixtos y de coníferas con especies esclerófilas y de transición.

Respecto a la ocupación del territorio, esta zona se caracteriza por una muy baja densidad de población ya que los núcleos circundantes no superan los 1.000 habitantes (según el IAEST, 2017: Uncastillo: 662 hab.; Sos del Rey Católico: 588 hab.; Luesia: 310 hab.; Castiliscar: 262 hab.) encontrándose a medio camino entre dos cabeceras comarcales (Ejea de los Caballeros y Sangüesa) y contando con algunos pueblos abandonados como Gordún o Barués, ubicados muy cerca del área afectada. La actividad económica principal es la primaria, en claro retroceso por el abandono de los campos y el envejecimiento de la población, lo que incrementa el peligro por incendios forestales.

2.3.2. Incendio de Villarluengo (Teruel)

Abarcó una extensión de unas 29.119 has extendiéndose sobre la Sierra de Bordón y las laderas más orientales del Sistema Ibérico, en la cuenca del río Guadalope. El factor desencadenante se debió a la caída de un rayo el 1 de julio de 1994 en el término municipal de Villarluengo, agudizado por la extrema sequía acumulada aquel año y las altas temperaturas existentes. Esta zona es propensa a sufrir inclemencias meteorológicas acompañadas de aparato eléctrico, tal y como expone Conesa (2005), quien destaca que la Ibérica turolense se caracteriza por una notable frecuencia de rayos por tormentas convectivas entre los meses de mayo a septiembre, debido a la elevada altitud existente (superior a los 1.000 m), la cercanía al mar Mediterráneo (unos 60 km) y la fuerte insolación en verano que favorece una potente baja térmica en el interior peninsular induciendo a los flujos dominantes de S-SE en este sector. Del total del área afectada, 8.320 has fueron en sectores dominados por el *Pinus halepensis* (28,6% del total), localizándose la mayor parte en la comarca aragonesa del Maestrazgo entre los términos municipales de Castellote, al norte; Villarluengo, al oeste; Mirambel, al sur; y Morella, al este, en la provincia de Castellón. Las parcelas experimentales se localizaron al norte del incendio, en el sector dominado por el *Pinus halepensis* en las laderas de la Sierra de Bordón, al sur de Castellote.

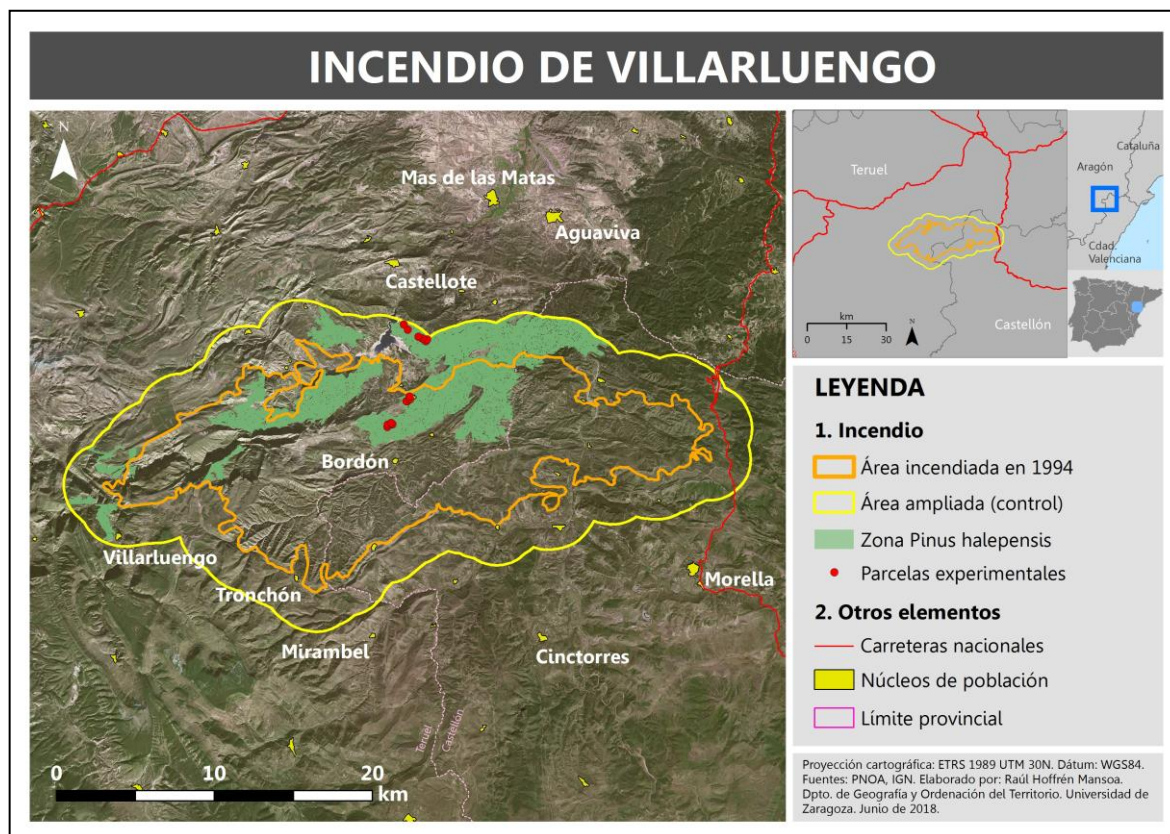


Fig. 2.4. Localización del incendio de Villarluengo

El área incendiada se sitúa entre las sierras de Molinos, Castellote y Bordón, con altitudes entre los 1.000 y 1.200 msnm, que constituyen la parte septentrional de la Ibérica en este sector. La mayor parte se ubica sobre materiales cretácicos, fundamentalmente carbonatados pero también sobre arcillas y areniscas. En la parte septentrional, estos materiales se combinan con otros detríticos de edad terciaria e incluso cuaternaria, aunque estos últimos tienen muy poca extensión superficial. Son frecuentes los relieves tabulares, las laderas escarpadas y profundas gargantas producto de la erosión ejercida por el río Guadalope. Los relieves de mayor entidad son el resultado de un conjunto pliegues anticlinales y sinclinales en dirección armoricana (NO-SE) en la parte central y meridional del incendio, y en dirección SE-NO hacia el norte. Su clima es el mediterráneo continentalizado debido a la barrera orográfica que supone la Cordillera Ibérica frente a los vientos húmedos del mar Mediterráneo, a pesar de la cercanía de éste, con variaciones diarias y estacionales bastante acusadas. Según Köppen, sería un clima de tipo Csa, mientras que la clasificación de Cuadrat *et al.* (2009) lo agrupa entre los climas submediterráneo continental cálido y submediterráneo húmedo. Estos dos climas se caracterizan por veranos secos calurosos e inviernos fríos y con escasas precipitaciones, las cuales tienden a concentrarse en las estaciones equinocciales y ser de carácter convectivo, si bien en el de tipo húmedo existe un ligero aumento en el régimen de precipitaciones. La red hidrográfica principal la conforma la cuenca del río Guadalope, afluente del río Ebro por su margen derecha, que fluye encajonado entre las sierras del entorno debido a la excavación que ha ejercido a lo largo del tiempo sobre los materiales blandos, dejando el resalte los más duros que dibujan las estructuras geomorfológicas en la actualidad. Se trata de un río puramente mediterráneo, muy irregular debido a la escasez de precipitaciones en toda su cuenca y con escasa energía de relieve. Por su parte, el río Bergantes, afluente del Guadalope, discurre por el sector más oriental. Los usos del suelo, según el proyecto CLC, están ocupados fundamentalmente por cultivos de secano, con algunos pocos sectores de regadío; y por formaciones forestales de bosques mixtos y de

coníferas, así como importantes extensiones de pastizales naturales. Asimismo, un pequeño sector en el norte del incendio está ocupado por áreas de extracción mineral.

La ocupación del territorio se caracteriza, al igual que Uncastillo, por la baja densidad de población. El núcleo de mayor población es Morella, en Castellón, con 2.441 hab. (ARGOS, 2017), mientras que de las poblaciones aragonesas con más de 500 habitantes destacan Mas de las Matas, con 1.270 hab. (IAEST, 2018); Castellote, con 688 hab. (IAEST, 2018) y Aguaviva, con 531 hab (IAEST, 2018). Esta zona se encuentra inscrita en la Serranía Celtibérica, también conocida como la *Laponia española* debido a que los niveles demográficos son de desierto demográfico (inferiores a 10 hab/km²) equiparándose a los de las zonas rurales de la Europa nórdica.

2.3.3. Incendio de Requena (Valencia)

El de Requena constituye el mayor de los incendios del área de estudio ya que se quemaron 38.750 has distribuidas entre las localidades Chelva y Tuéjar, al norte; Benágeber y Requena, al oeste; Siete Aguas, al sur; y Bugarra y Villar del Arzobispo, al este. Gran parte del incendio se produjo en zonas de *Pinus halepensis*, abarcando una superficie de 28.118 has (72,6% del total del área afectada). El origen del fuego, en este caso, se debió a factores humanos, que intensificaron el peligro por incendio debido a las condiciones climáticas existentes. Las parcelas experimentales se localizan en zonas diversas del incendio: un sector al noroeste, cerca de Benágeber, otro en la zona central siguiendo el eje del Turia, y un último al sur entre Requena y Buñol.

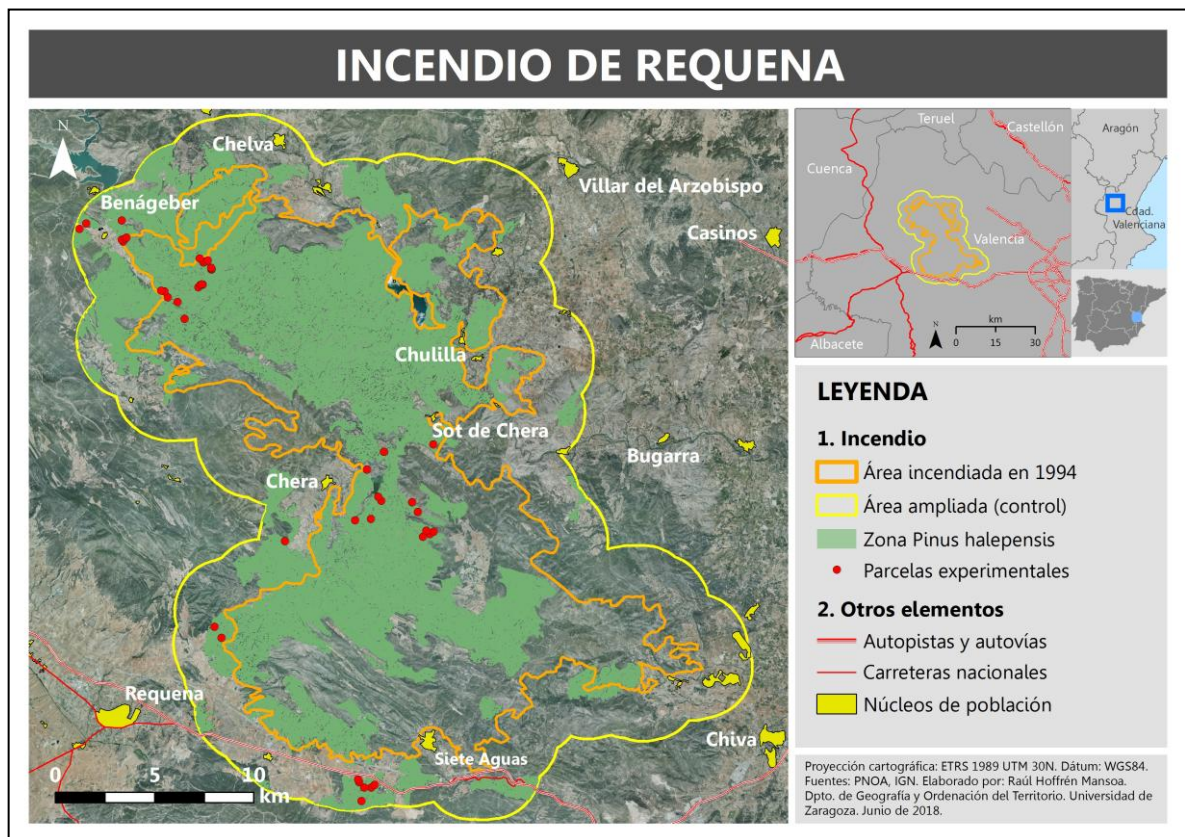


Fig. 2.5. Localización del incendio de Requena

Se localiza en el oeste de la provincia de Valencia, cerca de Castilla-La Mancha, en las comarcas de Requena-Utiel (sector sudoccidental), Hoya de Buñol (sector meridional) y Los Serranos (centro, este y norte). Las formas de relieve son diversas, dada la gran extensión de este incendio, desde la relativa planitud del terreno en la parte oriental, por el altiplano de Requena-Utiel, hasta los relieves fuertemente erosionados por el río Turia en la zona central y septentrional, formando un conjunto de cañones fluviales de grandes y empinadas pendientes entre la Sierra de Javalambre, en la Cordillera Ibérica, al norte; y la Sierra del Negrete, al sur. El área presenta un clima mediterráneo (Csa, según Köppen) con leves matices marítimos debido a la cercanía del mar, aunque en las partes más occidentales se produce una mayor continentalidad. La dominancia de los vientos de S-SE en verano y su elevación por las cordilleras propician la aparición de tormentas convectivas acompañadas de rayos, menos intensas que en la serranía turolense por la menor altitud, pero que pueden generar igualmente peligro por incendios, uniéndose la habitual escasez de precipitaciones y las elevadas temperaturas. Además, sin necesidad de que se generen tormentas, las diferencias térmicas en verano entre el mar Mediterráneo y la Península Ibérica propicia la generación de vientos fuertes y desecantes de ascendencia orográfica en todo el sector levantino, produciendo efecto Foehn que se torna en un factor intensificador de los incendios forestales. Los usos del suelo, según el CLC, están dominados por las masas boscosas de coníferas, en especial nuestra especie de estudio, el pino carrasco, así como otras coníferas. También dominan zonas agrarias de secano en las llanuras del oeste y sur con algunos puntos diseminados en el sector central, más accidentado, dedicadas en especial a los frutales y olivares; así como áreas industriales, en las zonas con mayor población en el sur y sudoeste del incendio.

La densidad de población no es tan baja como en los dos incendios anteriores, ya que en los alrededores hay núcleos relativamente importantes y poblados. Según datos de 2017 del Portal de Información ARGOS de la Generalitat Valenciana, Requena contaba con 20.320 hab., Utiel con 11.601 hab., Buñol con 9.596 hab. y Chelva con 1.516 hab., habiendo otros núcleos menores de importancia como Chera o Chulilla, constituyendo este último un destacado destino turístico de escalada aprovechando la accidentada topografía existente.

3. Materiales y métodos

El proceso metodológico seguido en este trabajo se dividió en diferentes fases, cada una de las cuales utilizó materiales concretos y siguió unos métodos específicos. El análisis de nuestro ámbito de estudio comenzó con la recopilación de los datos florísticos, dasométricos y geomorfológicos en las parcelas experimentales, así como del modelo de combustible en la escala *Prometheus*, para su posterior almacenamiento en una base de datos relacional creada específicamente en el presente proyecto para tal fin. Por otro lado, se obtuvieron datos LiDAR de los incendios de estudio para recabar información de la nube de puntos y contrastarlo con los datos de campo mediante diversos programas informáticos de tratamiento LiDAR y entornos SIG. Tras ello, se determinaron las variables de campo y LiDAR que mejor explicaban los modelos de combustible mediante el análisis de sus estadísticos básicos y su inclusión en el proceso de modelado estadístico. Durante esta fase, se probaron diferentes modelos no paramétricos y combinaciones de variables hasta que se lograron coeficientes de predicción significativos, lo que posibilitó la espacialización del modelo a partir de métricas LiDAR y la generación de las cartografías de modelos de combustible. La figura 3.1 reproduce de manera sintética los materiales y métodos generales empleados.

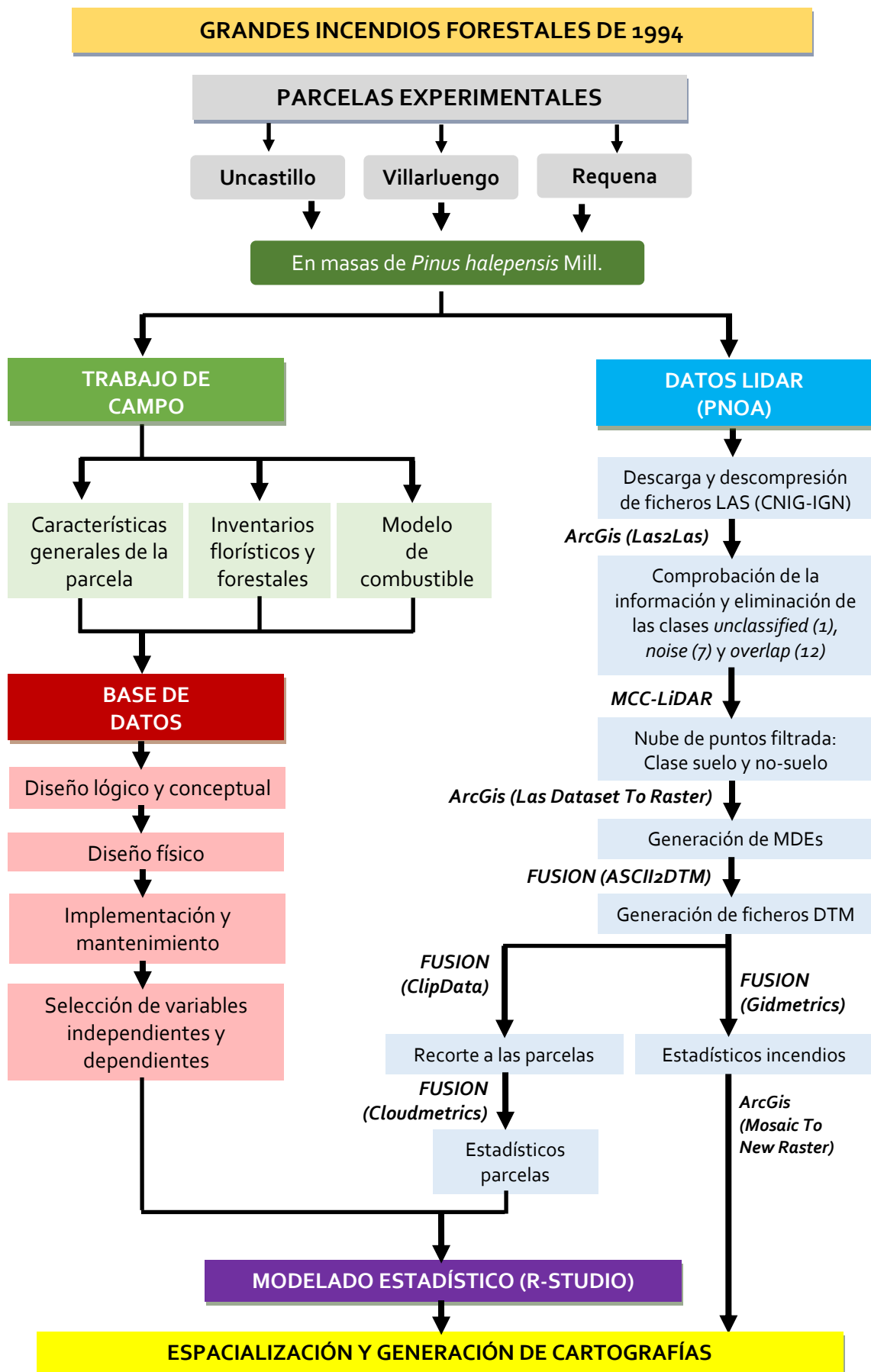


Fig. 3.1. Diagrama general de los métodos utilizados en el estudio. Elaboración propia

3.1. Materiales

Como se ha comentado, durante la elaboración del trabajo se utilizaron diversos métodos, que conllevó el empleo de diferentes materiales que se exponen a continuación.

3.1.1. Instrumentos para las labores de campo

Para las labores de campo se empleó un receptor GPS Leica VIVA GS15 CS10 GNSS de precisión submétrica para obtener el punto preciso del centro de la parcela, tratando de que la precisión de la captura del punto fuera lo más exacta posible. Asimismo, sirvió como referencia para colocar las guías delimitadoras o jalones en función del radio de la parcela. Los instrumentos utilizados en la medición de los árboles fueron un hipsómetro Vertex Haglöf Sweden® para determinar la altura de las especies arbóreas y de sus primeras ramas vivas, y la forcípula Haglöf Sweden® para las mediciones de los diámetros de los árboles. Los datos fueron recogidos en plantillas diseñadas para tal fin, siguiendo el modelo desarrollado en el marco del proyecto SERGISAT.

3.1.2. Base de datos relacional

Según Olaya (2014), se entiende como *Base de Datos* un conjunto de datos estructurado y almacenado de forma sistemática con la finalidad de facilitar su posterior utilización. Su uso, por tanto, es imprescindible para una buena gestión de la información geográfica ya que las aplicaciones SIG manejan grandes volúmenes de datos en el que se hace necesario su organización y estructuración en tablas relacionadas. Con ello se consigue una mayor independencia de los datos, se facilita su acceso desde diferentes aplicaciones y medios, y su almacenamiento en uno o varios lugares a partir de relaciones, lográndose en general una mayor eficiencia de la información que se quiere manejar (Olaya, 2014). Existen diferentes modelos de bases de datos en función de la estructura de los datos y de las relaciones existentes entre estos, siendo las más habituales las bases de datos jerárquicas, en red, orientadas a objetos y relacionales. Estas últimas constituyen el modelo de datos más difundido en la actualidad para los programas SIG (Escolano, 2015), utilizando un esquema bidimensional basado en tablas con un número determinado de filas o registros, que contienen la descripción de los elementos, y de columnas o campos, que almacenan las diferentes variables, propiedades o atributos de los elementos. Dado el gran volumen de información que las bases de datos suelen contener, los datos se estructuran en más de una tabla en función de su tipología y se enlazan entre ellas a partir de un esquema relacional. Estas relaciones se definen mediante claves, principales o secundarias, que son atributos únicos e invariables que posee un registro en una misma tabla pero comunes entre varias tablas, factor este último imprescindible para permitir las relaciones.

Otro elemento fundamental para la gestión de la información geográfica son los *Sistemas Gestores de Bases de Datos (SGDB)*, siendo el componente que permite la unión entre los propios datos y, en nuestro caso, los SIG. Según Olaya (2014), un SGDB es una pieza de *software* compleja porque debe responder a situaciones diversas y requerimientos, en ocasiones, elevados, realizando un trabajo distinto en función de la aplicación, aunque la base de datos sea la misma. Por su parte, Escolano (2015) lo define como una herramienta de gestión de bases de datos espaciales y temáticos, almacenando y utilizando archivos de datos de diferente naturaleza.

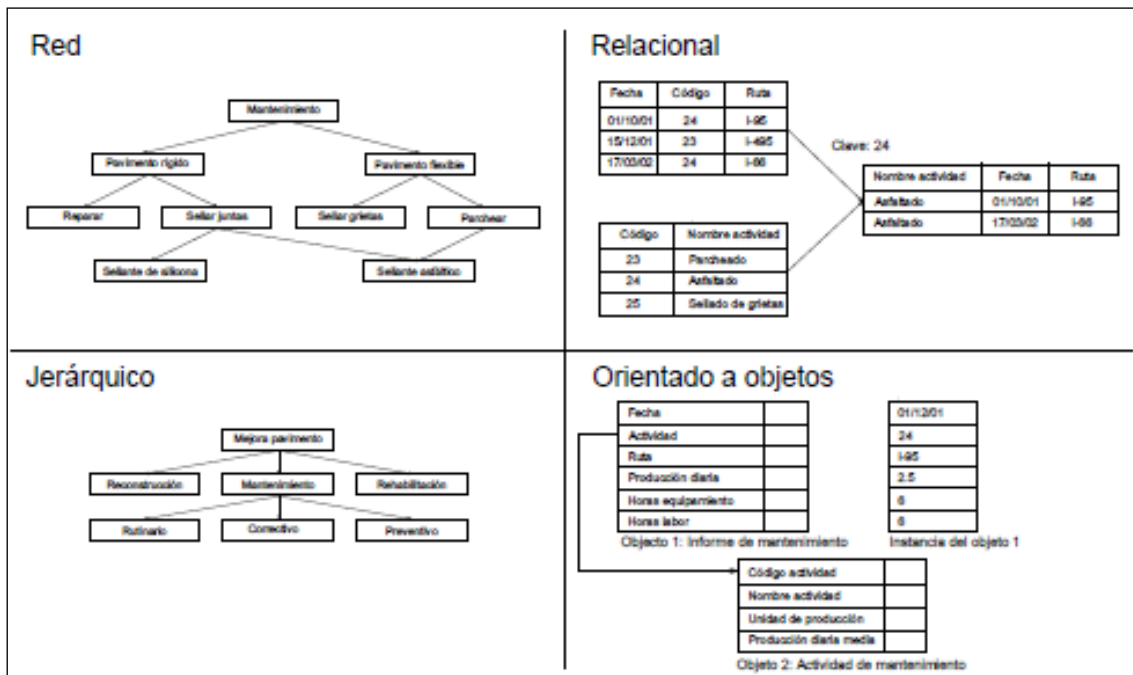


Fig. 3.2. Comparación de algunos modelos de bases de datos más frecuentes. Fuente: Olaya (2014)

La base de datos fue realizada en Microsoft Access a partir de la elaboración de tablas relacionales, consultas y formularios. Estos últimos fueron usados para la implementación y el tratamiento de los datos, por lo que fue necesario realizar determinadas labores de programación en código VBA (*Visual Basic for Access*) para la generación de funcionalidades automatizadas como cuadros combinados, autocompletado o cálculos automáticos, todo ello con el fin de optimizar los procesos. El análisis de la información se realizó, fundamentalmente, a partir del programa Microsoft Excel, previa exportación de los datos desde Access mediante consultas.

3.1.3. Tecnología LiDAR

El presente trabajo se ha apoyado en los datos LiDAR del programa PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea). Este proyecto está dirigido por el Ministerio de Fomento a través de la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) y cofinanciado entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas (PNOA, 2015). Su objetivo es la obtención de ortofotografías aéreas digitales con resoluciones de 25 o 50 cm y modelos digitales de elevaciones (MDE) de alta precisión en la totalidad del territorio español con renovaciones cada 2 o 3 años en función de la zona. Este último es calculado bien mediante correlación automática o a partir de datos obtenidos con los sensores LiDAR. Este marco se desarrolla bajo la Directiva comunitaria 2007/2/CE o Directiva INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*), traspuesto en el ordenamiento jurídico español a través de la Ley 14/2010, que establece la colaboración de los países de la Unión Europea en el desarrollo de una infraestructura de datos espaciales comunitaria relevante, concertada y de calidad con el propósito de formular, implementar, monitorizar y evaluar las políticas de impacto o de índole territorial del espacio de la UE.

El comienzo de la tecnología LiDAR en el programa PNOA comenzó a partir de la Directiva 2007/CE/60, o Directiva Europea de Inundaciones, referente a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, que modificó el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH) a

través del Real Decreto 9/2008 (posteriormente modificada a través del Real Decreto 638/2016) que estableció como elemento de gestión básico para la planificación territorial el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI). Se pensó en la tecnología LiDAR para la elaboración de estas cartografías a partir de la emisión de pulsos a las diferentes zonas del territorio fluvial, como el Dominio Público Hidráulico (DPH), la Zona de Flujo Preferente (ZFP), la Zona de Policía (ZP) y las Zonas Inundables (ZI). Sin embargo, comenzó a ser evidente que la realización de vuelos sólo para estas zonas resultaba muy costoso económicamente por lo que se decidió no acotarlo sólo a los territorios fluviales sino abarcarlo a la totalidad del espacio geográfico. En el año 2009, el PNOA comenzó la realización de la primera cobertura de datos LiDAR por España con una densidad media de 0,5 puntos por m², terminando de cubrir la totalidad del territorio en el año 2015. Este proceso de cubrimiento se hizo de manera progresiva en el tiempo, siendo en nuestros incendios forestales durante los años 2009 (Requena) y 2010 (Uncastillo y Villarluengo), tal y como se aprecia en la figura 3.3. De este modo, el estudio ha tenido en cuenta el retraso temporal de los datos LiDAR para los posteriores análisis estadísticos, dado que los datos de campo fueron recopilados en 2017, por lo que hay 7-8 años de diferencia entre ambos, periodo en el cual el *Pinus halepensis* y su sotobosque han incrementado su biomasa.

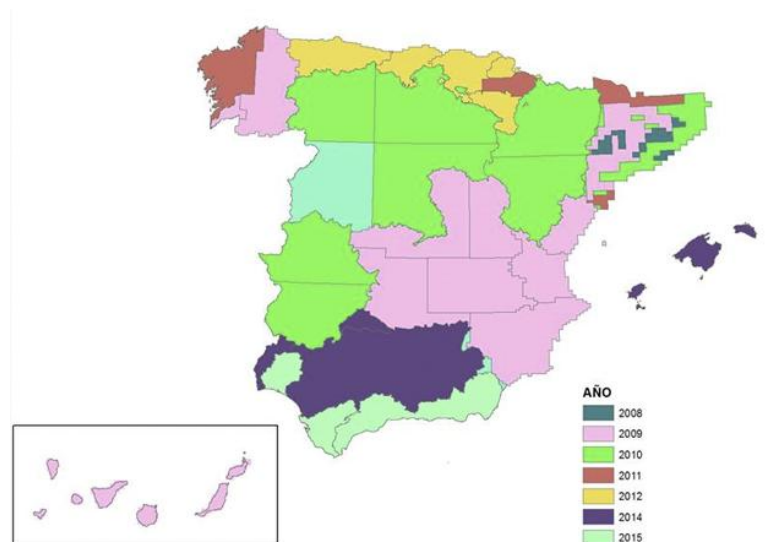


Figura 3.3. Evolución de la primera cobertura de datos LiDAR en España por el PNOA (2008-2015).

Fuente: Mappingis

En este estudio, la información LiDAR se utilizó para la estimación de diversas variables estructurales en las parcelas experimentales de los incendios y su comparación con los datos recogidos en campo. Para ello, se realizaron una gran cantidad de procesos de tratamiento de las nubes de puntos LiDAR que requirieron el uso de diversas herramientas. En este sentido, se utilizó ArcGis para la visualización de los ficheros LiDAR, a partir de la herramienta *LasTools*, así como otros procesos necesarios durante el tratamiento; el programa MCC-LiDAR v2.1, desarrollado por Evans y Hudak (2007), para el filtrado de la nube de puntos; y el software FUSION v3.7 (2018), desarrollado por Robert J. McGaughey de la *United States Department Of Agriculture (USDA)*, que está especialmente diseñado para el tratamiento de datos LiDAR en ambientes forestales. Dada la elevada cantidad de información que suponen los datos LiDAR, hubo que programar ficheros *Batch* para la ejecución de órdenes secuenciales con el fin de optimizar las tareas de procesado. Estos archivos permiten la automatización de tareas de manera sencilla siguiendo una estructura que sea capaz de asimilar el programa que lo vaya a ejecutar (en nuestro caso, ArcGis y FUSION) a partir de líneas de código almacenados en ficheros de texto, bajo la extensión BAT.

3.1.4. Otras herramientas utilizadas

Para la realización del modelado espacial se utilizó R-Studio, que utiliza el lenguaje de programación R enfocado hacia el análisis estadístico y gráfico de los datos. Por su parte, para la espacialización y la elaboración de las cartografías se utilizó el programa ArcGis.

Respecto a las fuentes de información manejadas, se recurrió a bibliografía científica, fundamentalmente centrada en los incendios forestales, el proceso de regeneración del *Pinus halepensis*, las características de los ambientes mediterráneos, el uso de las tecnologías para la gestión de los bosques y de los incendios, entre otros; así como libros especializados, actas de congresos o artículos en revistas científicas. También se manejó diversa documentación técnica específica para el uso de determinadas aplicaciones que han sido necesarias durante el proceso del proyecto.

3.2. Metodología

Los métodos utilizados en el estudio se dividieron en cinco fases principales. La primera consistió en el trabajo de campo realizado en las diferentes parcelas de estudio, donde se obtuvieron los datos generales de las mismas, incluida la estimación del modelo de combustible, así como su información florística, dasométrica y geomorfológica. La segunda fase se centró en el diseño, la elaboración y la implementación de una base de datos relacional para el almacenamiento de la información recopilada en campo y el posterior tratamiento estadístico y cartográfico de las variables que mejor explican el modelo. En la tercera fase se trabajó con los datos LiDAR de los incendios forestales analizados, relacionando dicha información con los datos de campo y adquiriendo métricas para su posterior análisis, modelado y espacialización de los resultados. La cuarta fase refiere al tratamiento estadístico de los datos de campo recopilados en la base de datos y de la información LiDAR, seleccionando en ambos casos las variables más explicativas. Por último, la quinta fase fue la espacialización del modelo de combustible, generado con las parcelas de campo y utilizando las variables LiDAR para la totalidad del incendio, y la generación de las cartografías.

3.2.1. Recopilación de datos en campo

La primera fase del presente estudio lo constituyó el trabajo de campo en el que se recogieron los datos cuantitativos y cualitativos en las parcelas experimentales de las principales variables, que permitieron estimar posteriormente los modelos de combustible para el conjunto de parcelas. Éstas fueron de radio circular variable, en función de la configuración del terreno, su topografía y la densidad de la cubierta vegetal, muestreándose parcelas de 1, 2, 5, 10 y 15 m de radio. Además, se seleccionaron zonas heterogéneas en cuanto a pendiente, orientación y severidad del fuego con el fin de recoger la variabilidad espacial más significativa. Asimismo, se establecieron parcelas de control no afectadas por los incendios, ubicadas en áreas próximas a éstos. El total de parcelas muestreadas fue de 73.

Como se ha comentado anteriormente, este trabajo se enmarca dentro del proyecto SERGISAT, por lo que las parcelas experimentales ya habían sido asignadas siguiendo los criterios descritos en el párrafo anterior. Asimismo, algunos de los datos de campo que usa este estudio ya fueron recogidos en diferentes salidas efectuadas por el grupo de investigación. No obstante, durante la colaboración prestada en el proyecto, se efectuaron diversas salidas de campo contribuyendo en el muestreo de 24 parcelas experimentales del incendio de Requena, entre los días 26 y 30 de diciembre de 2017, en el que se recopilaron

datos utilizados posteriormente para la estimación de los modelos, siendo partícipe, además, de una de las fases más importantes para la elaboración del presente estudio y que permitió conocer los métodos y materiales empleados.

Tabla 3.1. Número de parcelas experimentales totales y por incendio

Incendio	Nº de parcelas
Uncastillo	6
Villarluengo	16
Requena	51
TOTAL	73

En estas tareas, se recopiló información de diversos parámetros como el diámetro de las parcelas, su pendiente y orientación, la fracción de cubida cubierta (FCC) por estratos, datos de materia orgánica y profundidad del suelo, presencia o ausencia de erosión, especies florísticas presentes y su dominancia por estrato, y la caracterización de árboles tipo así como la cuantificación de los regenerados, entre otros. Esta información permitió, además, estimar el modelo de combustible de la parcela e incluirla como una variable de campo más, aunque posteriormente fue preciso revisarla en gabinete, a partir de fotografías o de las restantes variables recogidas en campo. En definitiva, el muestreo estuvo basado en las características topográficas, las características dasométricas, estructurales y de biomasa de la vegetación y las características edáficas y geomorfológicas de cada una de las parcelas. Además, se recogió mediante GPS las coordenadas UTM del punto central de cada parcela para su posterior espacialización.

A partir del centro de la parcela se colocaron cuatro jalones en los respectivos puntos cardinales que establecían el área límite de las parcelas muestreadas. La variabilidad del radio dependió de factores como la configuración de la propia parcela, la topografía existente, la densidad de la cubierta vegetal o la presencia de otros elementos limitantes como parcelas privadas, vallado o barrancos pronunciados, entre otros. Una vez establecido el área, se recogieron las variables agrupadas en dos fichas; una para las características generales y de las especies florísticas de la parcela, y otra con el inventario de los árboles tipo agrupados por clases diamétricas, incluyendo los árboles menores de 2 metros, propios de ambientes afectados por incendio, referentes al regenerado. Para cada una de las fichas se recogieron las siguientes variables:

Inventario general y florístico:

- Características generales: Se recopilaron datos genéricos de la parcela, como el incendio al que pertenece, su código identificativo, la fecha y hora de realización del inventario, las coordenadas GPS, la pendiente y la orientación.
- Fracción de cubida cubierta (FCC) por estratos: Hace referencia al grado de cubrimiento por cada estrato representado en tanto por ciento, distinguiéndose entre el arbóreo (mayor de 5 m), arborescente (3 a 5 m), arbustivo (1 a 3 m), subarbustivo (menos de 1 m) y herbáceo. También se recoge el porcentaje de la pedregosidad existente.
- Modelo de combustible: Se hizo siguiendo la escala *Prometheus* y fue estimado tras haber realizado la totalidad del inventario tanto florístico como forestal.
- Datos del suelo: Se determinó la profundidad en cm del Horizonte O (parte superficial situada sobre el Horizonte A, formado por materia orgánica) y del Horizonte A (capa más

superficial del suelo).

- **Datos erosivos y geomorfológicos:** Se recopiló el tipo de erosión existente, diferenciándose entre rills, laminar, enlosado, pedestales y movimientos en masa, así como su intensidad y el porcentaje de extensión en cada parcela.
- **Inventario florístico:** Se recogió el nombre científico de las especies presentes en cada parcela, el estrato al que pertenecen y la abundancia-dominancia por especie y estrato representado por los siguientes códigos: 5 (>80%), 4 (60-80%), 3 (40-60%), 2 (20-40%), 1 (<20%) y + (residual).
- **Observaciones:** Otros datos de interés como el estado general de la parcela y de los árboles.

Inventario forestal: Se compilaron datos de los árboles referentes al diámetro mayor y menor de los fustes, la altura total y la altura de la primera rama viva para cada una de las diez clases diamétricas establecidas: menos de 2,5 cm; 2,5-4,9 cm; 5-7,4 cm; 7,5-12,4 cm; 12,5-22,4 cm; 22,5-27,4 cm; 27,5-32,4 cm; 32,5-37,4 cm; 37,5-42,5 cm y más de 42,5 cm. Además, se totalizó el número de pies para cada una de las clases diamétricas, con el fin de estimar el grado de biomasa vegetal existente en cada parcela. La estimación de las alturas por clases diamétricas se realizó mediante el hipsómetro; para ello, fue preciso determinar la altura respecto del suelo teniendo como base los 1,30 m (altura del pecho) para establecer la altura total del árbol. Esta referencia también se utilizó en las mediciones del diámetro mayor y menor utilizando la forcípula.

The figure shows two detailed field data sheets. Sheet (a) on the left is a general floristic inventory form, and sheet (b) on the right is a forest inventory form. Both include sections for general site data, species/stratum recording, and specific measurements like erosion type and tree damage.

(a) Ficha de inventario general y florístico:

- Header:** Incendio, Nº parcela, Coordenada, Autores, Nº Fotos, Fecha, Hora inicio, Hora fin.
- Stratum and Abundance Table:**

Estrato	FCC %	Estrato	Especie	Abundancia dominancia por especie
5	Arbóreo > 5 m:			
4	Arbóreo 3-5 m:			
3	Arbustivo 1-3 m:			
2	Subarbustivo <1m:			
1	Herbáceo:			
	Podrigosidad:			
- Modelo de combustible:** Prometheus, Rothwald.
- Prof. Horizonte C:**
- Prof. Horizonte A:**
- Nº muestras suelo:**
- Datos generales de la parcela:** Intersidad, Tipo de erosión (Rills, Laminar, Enlosado, Pedestales, Mov. Masa).
- Estado general del arbolado/vegetación:** Daños (viento, hongos, perforadores, defoliosos, mairidago...), Especies afectadas.
- Diagrama:** A circular diagram with radial and concentric grid lines.
- Observaciones:** A large text area at the bottom right.

(b) Ficha de inventario forestal:

- Header:** Especie (2 a 10 m), C. diam., Ø (cm), H (m), H 1.1 W., Num. Pies.
- Table 1 (Left):**

Especie (2 a 10 m)	C. diam.	Ø (cm)	H (m)	H 1.1 W.	Num. Pies
<2.5					
2.5-4.9					
5.0-7.4					
7.5-12.4					
12.5-22.4					
22.5-27.4					
27.5-32.4					
32.5-37.4					
37.5-42.4					
>42.4					
- Table 2 (Right):**

Especie (2 a 10 m)	C. diam.	Ø (cm)	H (m)	H 1.1 W.	Num. Pies
<2.5					
2.5-4.9					
5.0-7.4					
7.5-12.4					
12.5-22.4					
22.5-27.4					
27.5-32.4					
32.5-37.4					
37.5-42.4					
>42.4					
- Regeneración de árboles (h=son) <2 m:**

Especie	h < 0.5 m	0.5 < h < 1 m	1 < h < 2 m
- Observaciones:** A large text area at the bottom right.

Fig. 3.4. Detalle de las fichas utilizadas en el campo para la recopilación de la información. (a) Izda.: Ficha de inventario general y florístico. (b) Dcha.: Ficha de inventario forestal.

3.2.2. Diseño e implementación de la base de datos

Como se ha explicado anteriormente, las bases de datos relacionales resultan idóneas para la gestión de datos forestales y para su integración en un SIG. Por tanto, para este estudio se creó una base de datos relacional con el fin de almacenar de manera organizada y estructurada los datos recogidos en los trabajos de campo, para su posterior análisis, tratamiento estadístico y espacialización. Gran parte de las ventajas que proporcionan las bases de datos relacionales se deben a su diseño adecuado a los objetivos del proyecto y a la naturaleza de la información a modelar (Escolano, 2015); por este motivo, fue necesario establecer diferentes fases durante el proceso de creación.

La primera consistió en el diseño lógico y conceptual de la base de datos, que estuvo basada en la determinación a nivel general de los objetivos y las funciones básicas de la base de datos, que consistieron en el almacenamiento y la disposición de la información en cada una de las parcelas experimentales de los datos espaciales, florísticos, dasométricos, geomorfológicos y del modelo de combustible estimado para su posterior análisis y tratamiento. En consecuencia, se decidió elaborar una base de datos relacional compuesta por tablas conectadas entre sí mediante un campo único que actuase como clave.

La siguiente fase consistió en el diseño físico, destinada a modelar el contenido de la base de datos mediante la definición de las tablas relacionales, su estructura, las claves principales y las conexiones entre estas. Se determinó la creación de cuatro tablas conectadas entre sí a través de diferentes identificadores únicos para las parcelas, las especies florísticas, los árboles inventariados y las especies regeneradas:

- **"GENERAL"**: Para el almacenamiento de los datos generales de la parcela, compuestos por su identificativo único, código, radio, pendiente, orientación, vegetación dominante, los porcentajes de la FCC para cada estrato, el porcentaje de pedregosidad, el modelo de combustible, los datos edáficos y geomorfológicos, los deterioros observados en la vegetación y otras observaciones de interés.
- **"FLORISTICO"**: Para el almacenamiento de datos de las especies florísticas, incluyendo un código identificativo único, el estrato al que pertenecen, su nombre científico, la dominancia por especie y por estrato y la parcela en la que se localizan.
- **"ARBOLES"**: Para el almacenamiento de los datos de las especies arbóreas de más de 2 metros de altura agrupadas por clases diamétricas, ya establecidas en las fichas de campo. Se almacenaron, por tanto, los datos por cada árbol tipo por cada una de las clases diamétricas existentes, siendo éstos el diámetro mayor y menor, la altura del árbol y de su primera rama viva en metros y el número de pies totales para cada clase. Cada uno de ellos posee, además, un identificativo único y la especie a la que pertenecen, identificada previamente en la tabla "FLORISTICO".
- **"REGENERADO"**: Para el almacenamiento del número total de especies arbóreas de menos de 2 metros de altura (es decir, especies que están en proceso de regeneración) agrupadas en tres tamaños: menos de 0,5 m, entre 0,5 y 1 m, y entre 1 y 2 m.

Durante el proceso de creación de las tablas se diseñó su estructura, es decir, los campos para cada una de ellas en función de la información contenida y de los atributos de sus elementos. Los campos fueron nombrados de una manera simplificada pero de fácil relación con el componente real, debiendo definir, además, el tipo de dato y los metadatos. Estos últimos son de gran utilidad ya que describen de manera sintética y adicional el significado y la naturaleza del campo y del conjunto de datos existentes en ellos.

En las tablas 3.2 a 3.5 se presenta la estructura para cada una de las cuatro tablas creadas.

Tabla 3.2. Estructura de la tabla "GENERAL"

Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
ID_PAR	Texto	Identificativo único de la parcela
COD_PAR	Texto	Código general de la parcela
TAM	Texto	Tamaño de la parcela (radio)
PTE	Número	Pendiente media de la parcela (en grados)
RUMBO	Texto	Orientación de la parcela
VEG	Texto	Vegetación predominante
L	Número	Limitante edafoclimático (1: Atlántico. 2: Mediterráneo)
O	Número	Orientación (1: Umbría. 2: Solana)
P	Número	Pendiente (1: Baja, <25%. 2: Alta, >25%)
S	Número	Severidad (0: Control. 1: Baja. 2: Media. 3: Alta)
EST_5	Número	Fracción cabida cubierta (%) del estrato arbóreo (> 5 m)
EST_4	Número	Fracción cabida cubierta (%) del estrato arborescente (3-5 m)
EST_3	Número	Fracción cabida cubierta (%) del estrato arbustivo (1-3 m)
EST_2	Número	Fracción cabida cubierta (%) del estrato subarbustivo (< 1 m)
EST_1	Número	Fracción cabida cubierta (%) de herbáceas y matorrales.
PEDREG	Número	Pedregosidad (%)
COMB	Número	Modelo de combustible <i>Prometheus</i>
SUELO_O	Número	Profundidad Horizonte o (cm)
SUELO_A	Número	Profundidad Horizonte A (cm)
P1	Número	Materia orgánica. Muestra 1
P2	Número	Materia orgánica. Muestra 2
P3	Número	Materia orgánica. Muestra 3
MO	Número	Materia orgánica. Total
ERO_RILLS_INT	Texto	Erosión tipo rills: Intensidad
ERO_RILLS_SUP	Texto	Erosión tipo rills: Superficie de la parcela (%)
ERO_LAMIN_INT	Texto	Erosión laminar: Intensidad
ERO_LAMIN_SUP	Texto	Erosión laminar: Superficie de la parcela (%)
ERO_ENLOS_INT	Texto	Erosión enlosado: Intensidad
ERO_ENLOS_SUP	Texto	Erosión enlosado: Superficie de la parcela (%)
ERO_PEDES_INT	Texto	Erosión pedestales: Intensidad
ERO_PEDES_SUP	Texto	Erosión pedestales: Superficie de la parcela (%)
MOV_MASA_INT	Texto	Movimientos en masa: Intensidad
MOV_MASA_SUP	Texto	Movimientos en masa: Superficie de la parcela (%)
DETERIORO	Texto	Deterioros observados
OBSERV_ARBOLES	Texto	Observaciones del estado de los árboles
OBSERVACIONES	Texto	Observaciones generales

Tabla 3.3. Estructura de la tabla "FLORISTICO"

Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
ID_FL	Autonumérico	Identificativo único de la especie
EST	Número	Estrato perteneciente. 5: Arbóreo. 4-Arborescente. 3: Arbustivo. 2: Subarbustivo. 1: Herbáceo.
ESPECIE	Texto	Nombre científico de la especie
DOMIN	Texto	Abundancia de la dominancia por especie y por estrato. 5: Muy abundante. 4: Abundante. 3: Abundancia media. 2: Poco abundante. 1: Muy poco abundante. +: Residual.
ID_PAR	Texto	Identificativo de la parcela a la que pertenece el inventario

Tabla 3.4. Estructura de la tabla "ARBOLES"

Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
ID_AR	Autonumérico	Identificativo único del árbol
ID_PAR	Texto	Identificativo de la parcela a la que pertenece
ID_FL	Texto	Identificativo de la especie a la que pertenece
DIAM_A	Número	Diámetro mayor (cm)
DIAM_B	Número	Diámetro menor (cm)
INTERVALO_DIAM	Texto	Clase diamétrica
H	Número	Altura (m)
H_VV1	Número	Altura de la primera rama verde (m)
PIES	Número	Cantidad total de pies

Tabla 3.5. Estructura de la tabla "REGENERADO"

Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
ID_REG	Autonumérico	Identificativo único del árbol regenerado
ESPECIE	Texto	Nombre científico de la especie
H_MENOR	Número	Cantidad de árboles regenerados < 0,5 m
H_MEDIO	Número	Cantidad de árboles regenerados de 0,5-1 m
H_MAYOR	Número	Cantidad de árboles regenerados de 1-2 m
ID_PAR	Texto	Identificativo de la parcela a la que pertenece

El último paso de la fase del diseño físico consistió en la creación de las relaciones entre las tablas, enlazándolas a partir de campos en común, es decir, de las claves principales siguiendo el modelo entidad-atributo-relación o EAR. La entidad representa el componente a partir del cual se recoge la información, diferenciándose de otros componentes por sus propiedades y cuyos atributos o características son las definitorias de su naturaleza. Éstas, a su vez, pueden formar parte de un conjunto de entidades, cada una de las cuales poseen características o atributos idénticos pero tienen propiedades distintivas. Sirva de ejemplo el caso de nuestro estudio, en el que las entidades estarían representadas por las parcelas experimentales, las especies florísticas, los árboles inventariados y las especies regeneradas. Todas tienen características o atributos que las definen de manera inequívoca: las parcelas incluyen su código de parcela, las características vegetales, edáficas y geomorfológicas, sus especies florísticas y sus árboles inventariados y regenerados; las especies florísticas contienen el nombre de la especie, su estrato y su dominancia y la parcela a la que pertenecen; los árboles inventariados poseen la información dasométrica y la especie florística de la que forman parte; y los regenerados la cantidad de pies por cada uno de los niveles de altura así como la parcela en la que se integran. Sin embargo, las propiedades de sus características son diferentes entre todas ellas, permitiendo distinguir las unas de otras. Las propiedades, campos o claves que han servido de atributos para establecer las relaciones han sido:

- **ID_PAR:** Identificativo único de cada parcela experimental.
- **ID_FL:** Identificativo único de cada especie florística.
- **ID_AR:** Identificativo único de cada árbol inventariado.
- **ID_REG:** Identificativo único de cada especie arbórea regenerada.

En la figura 3.5 se muestra un diagrama del modelo EAR de la base de datos del presente estudio, simplificada la información contenida en cada una de las tablas.

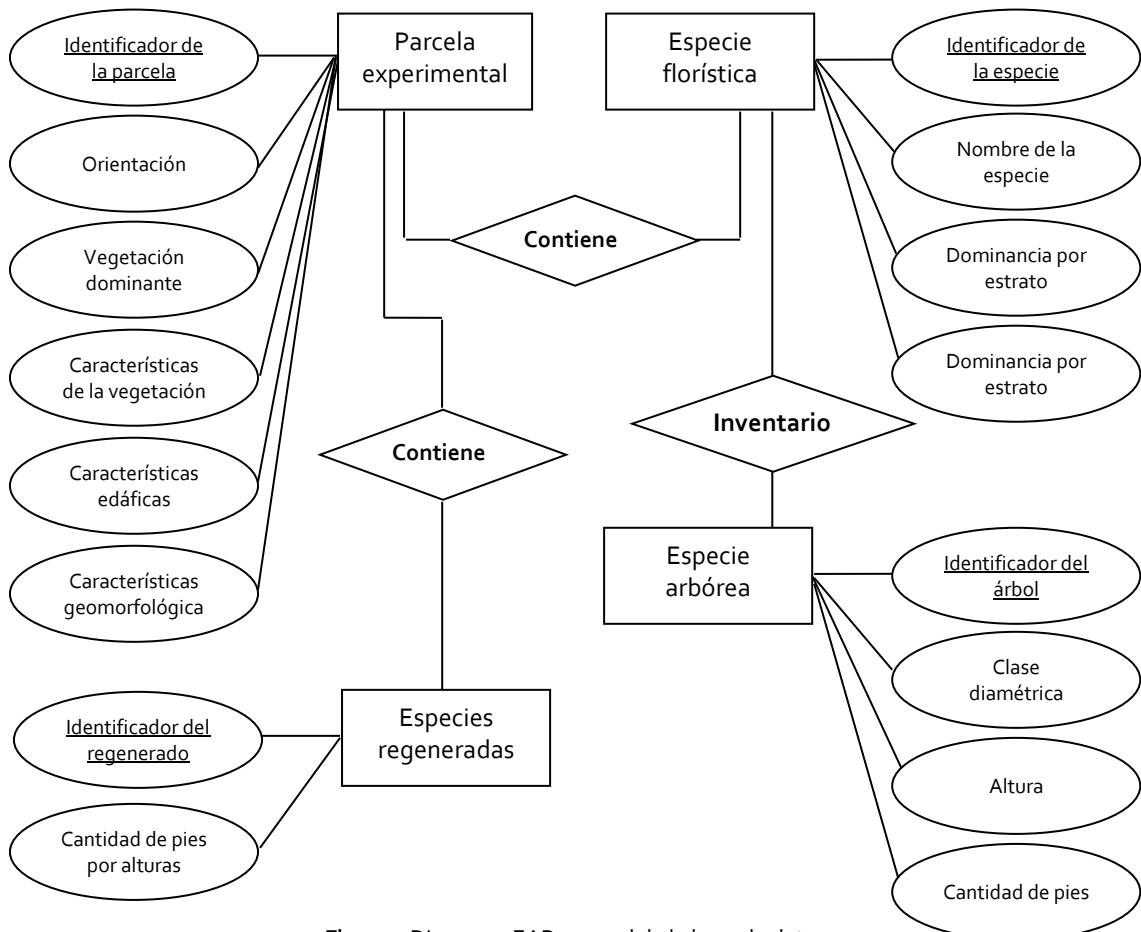


Fig. 3.5. Diagrama EAR general de la base de datos

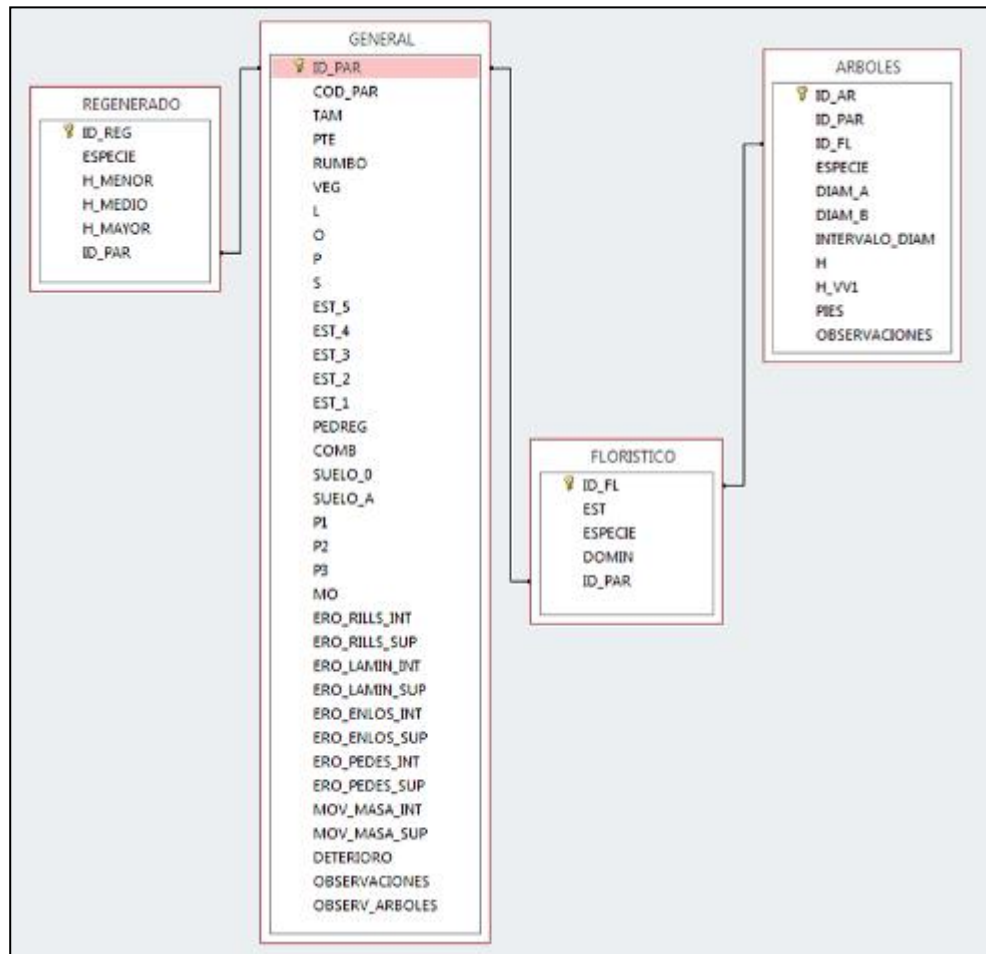


Fig. 3.6. Esquema relacional de la base de datos

Con el establecimiento de estas relaciones, cada parcela experimental, cuyos datos se almacenan en la tabla "GENERAL", contiene información no sólo de los campos incluidos en esta tabla sino también información de las especies vegetales, sus estratos y dominancia definidos en la tabla "FLORISTICO", existiendo en estas últimas datos de las especies arbóreas inventariadas, almacenadas en la tabla "ARBOLES". En definitiva, en la información de una parcela se accede a toda la información de la misma y no sólo la almacenada en la propia tabla, pudiéndose consultar las especies y los árboles que han sido inventariados, así como los regenerados, gracias a las relaciones entre las diferentes tablas.

Tras el diseño físico, la última fase consistió en la **implementación** de los datos, es decir, la introducción de la información en la base de datos, realizado no directamente en las tablas sino a través de formularios, los cuales permitieron trabajar con los registros de un modo más eficiente gracias a las funcionalidades que incorpora y a la posibilidad de generar procesos automatizados mediante lenguaje VBA. Entre otras facilidades, permitió operar con los datos de una manera más ordenada y flexible, disponer de campos de entrada y de edición personalizados y adaptados, y crear rutinas que simplificaron un gran número de operaciones. Una contribución importante del presente trabajo dentro del proyecto SERGISAT fue la creación de esta base de datos y la introducción de la totalidad de las variables recogidas en campo por el grupo GEOFOREST-IUCA, no sólo para las parcelas experimentales con las que ha trabajado este estudio sino para la totalidad del proyecto (220 parcelas).

3.2.3. Procesamiento de datos LiDAR

3.2.3.1. Descarga y comprobación de los datos LiDAR

Los datos LiDAR del programa PNOA usados en el presente trabajo para el análisis espacial de las parcelas de estudio, están disponibles de manera pública en el centro de descargas del CNIG del Instituto Geográfico Nacional. Se trata de ficheros digitales con información altimétrica de la nube de puntos que se distribuyen en ficheros de 2x2 km de extensión formando un conjunto de mallas cuadrículas que cubren completamente el territorio nacional. Los datos se encuentran georreferenciados por el sistema geodésico de referencia ETRS89 para la Península Ibérica, compatible con el dátum WGS84, y la proyección en formato UTM según el huso que corresponda. El formato de descarga se ofrece en archivos LAZ, un formato comprimido de los archivos LAS; por lo tanto, la primera tarea consistió en la descarga de la información LiDAR y su descompresión para el posterior tratamiento. Para la obtención sólo de las cuadrículas de la nube de puntos de los incendios forestales estudiados, se procedió a cargar la información vectorial de los mismos, uno por uno en formato SHP a partir de una herramienta disponible en el centro de descargas del CNIG que permite la búsqueda de los archivos deseados mediante una máscara vectorial de entrada. Los ficheros fueron descargados incendio a incendio y después descomprimidos de formato LAZ a LAS mediante otra herramienta de descompresión y visualización en JAVA disponible en el propio CNIG.

Se obtuvieron 101 cuadrículas LAS de 2x2 km para el incendio de Uncastillo, 180 cuadrículas para el de Villarluego, y 230 para el de Requena (figura 3.7). Todos ellos se encontraban clasificados por defecto de manera automática en diferentes clases (se detallan en la tabla 3.6) y, además, existían algunos errores altimétricos que están catalogados como *ruido*, por lo que antes de su tratamiento se requirió realizar tareas de filtrado de la nube de puntos para que los subsiguientes procesos fueran lo más precisos posibles. Antes de esta operación, se procedió a la instalación de la extensión para ArcGis **LasTools**, que posibilita operar en este programa con la nube de puntos LAS. En primer lugar, se crearon tres archivos **LasDataset** que sirven para integrar en un solo fichero las cuadrículas LAS, en este caso el conjunto de las mallas para cada uno de los incendios, con el fin de visualizar, analizar y detectar posibles errores de la nube de puntos. En este paso inicial, se debe establecer la proyección UTM de cada uno de los ficheros generados, siendo para todos los incendios la Zona 30. Tras este paso y la comprobación de las cuadrículas LAS, se procedió a la extracción o filtrado del *ruido* (clasificado como clase 7 o “*noise*”) de cada uno de los **LasDataset** a partir de la herramienta **Las2Las** de la extensión **LasTools** para ArcGis. Este proceso de filtrado se realizó para los cinco incendios mediante la generación de un *Batch* en la propia herramienta, donde se indica la malla LiDAR que va a ser filtrada, la clase de la nube de puntos a extraer (clase 7) y el nombre de la nuevo fichero LAS una vez filtrado. Tras ello, se vuelven a generar nuevos ficheros **LasDataset** para comprobar que el filtrado ha sido realizado correctamente.

Tabla 3.6. Clases predefinidas de los datos LiDAR del PNOA

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

Otro de los posibles fallos que puede existir en la nube de puntos y que fue preciso comprobar antes del comienzo del tratamiento fue la existencia de errores en solapes entre las mallas que provocasen la distorsión de los datos altimétricos. Este hecho se debe a que los diferentes vuelos efectuados por el PNOA coinciden espacialmente en algunas franjas, por lo que la información registrada puede contener errores en la horizontal (coordenadas x , y) o en la vertical (coordenada z). Para ello, se comprobó que la altimetría era correcta mediante la generación de perfiles altimétricos sólo con la clase 12 ("overlap"), que es la que almacena los puntos de solape. Tras los análisis realizados, se comprobó que los tres incendios poseían errores más o menos significativos en esta clase que podían desvirtuar los resultados, por lo que se decidió eliminarla siguiendo el mismo procedimiento que en la extracción de la clase *ruido*. Posteriormente, tras las comprobaciones de los primeros modelos espacializados, se decidió excluir también la clase 1 ("unsigned") por errores existentes en esta clase que son detallados en el apartado 3.3.6.

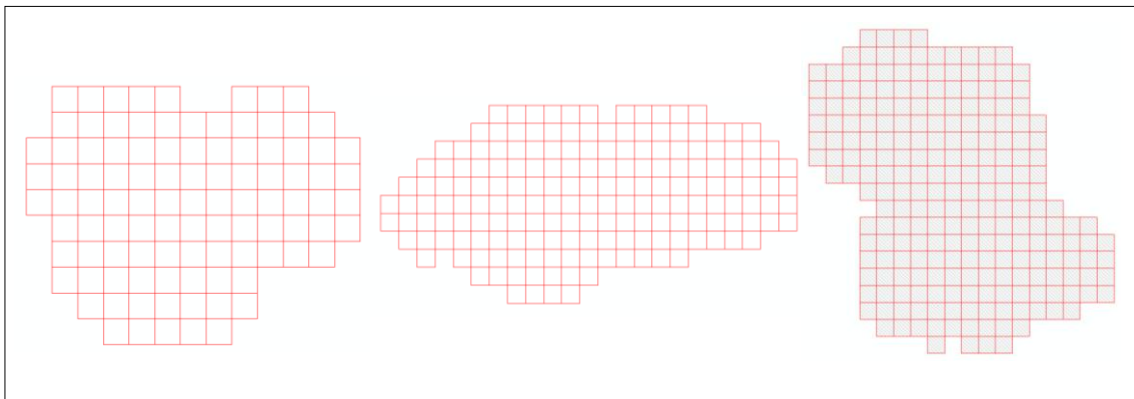


Fig. 3.7. Mallas LiDAR para cada uno de los tres incendios (Izda.: Uncastillo. Centro: Villarluego. Dcha.: Requena)

3.2.3.2. Tratamiento de los datos LiDAR

Una vez efectuados los procesos de filtrado o extracción de las clases de la nube de puntos proclives a generar errores, se procedió al tratamiento de los datos LiDAR que se agruparon en varios procesos: filtrado y generación de modelos digitales de elevaciones (MDE), selección de parcelas y normalización de la nube de puntos y, finalmente, generación de estadísticos para su posterior inclusión en el proceso de modelado. Este tratamiento se realizó para cada uno de los tres incendios a partir de los ficheros LAS sin la clases *ruido*, *solape* y *unsigned*, esta última tras comprobaciones posteriores.

a. Filtrado de la nube de puntos

Este proceso tuvo como fin la generación de un MDE a partir de la nube de puntos sin las clases con errores, por lo que fue necesario filtrar o reclasificar la nube de puntos como suelo y no-suelo. Para ello, se utilizó un filtrado en superficie ya que es el que mejor se adapta a la primera cobertura realizada por el PNOA en ambientes forestales mediterráneos de *Pinus halepensis* (Montealegre *et al.*, 2015). El filtro se realizó mediante el programa MCC-LiDAR v2.1, a partir de un *script* que identifica inicialmente todos los puntos de la nube como de suelo desnudo y, posteriormente, procede a eliminar aquellos que no se ajustan al modelo de superficie mediante iteraciones sucesivas (Vosselman y Mass, 2010).

El *script* de filtrado constó de tres parámetros: El inicial establece la asignación de los

parámetros "s" y "t"; el primero dependiente del tamaño de los objetos presentes en la escena así como del espacio entre los puntos LiDAR, para el que se le asignó el valor 1; y el segundo referido a la tolerancia de la curvatura para el *scale domain*, asignándole un valor de 0,3. Los otros dos parámetros se corresponden al fichero LAS de entrada que va a ser filtrado, seguido del fichero LAS de salida. El *script* se ejecutó en la aplicación MCC-LiDAR v2.1 mediante archivos *Batch* para cada incendio y el resultado fue la generación de una nube de puntos clasificada en dos grandes grupos: clase no-suelo o "*unassigned*" y clase suelo o "*ground*". Con ello, se obtuvieron las alturas del suelo permitiendo generar el MDE a partir de su conversión de nube de puntos a formato ráster.

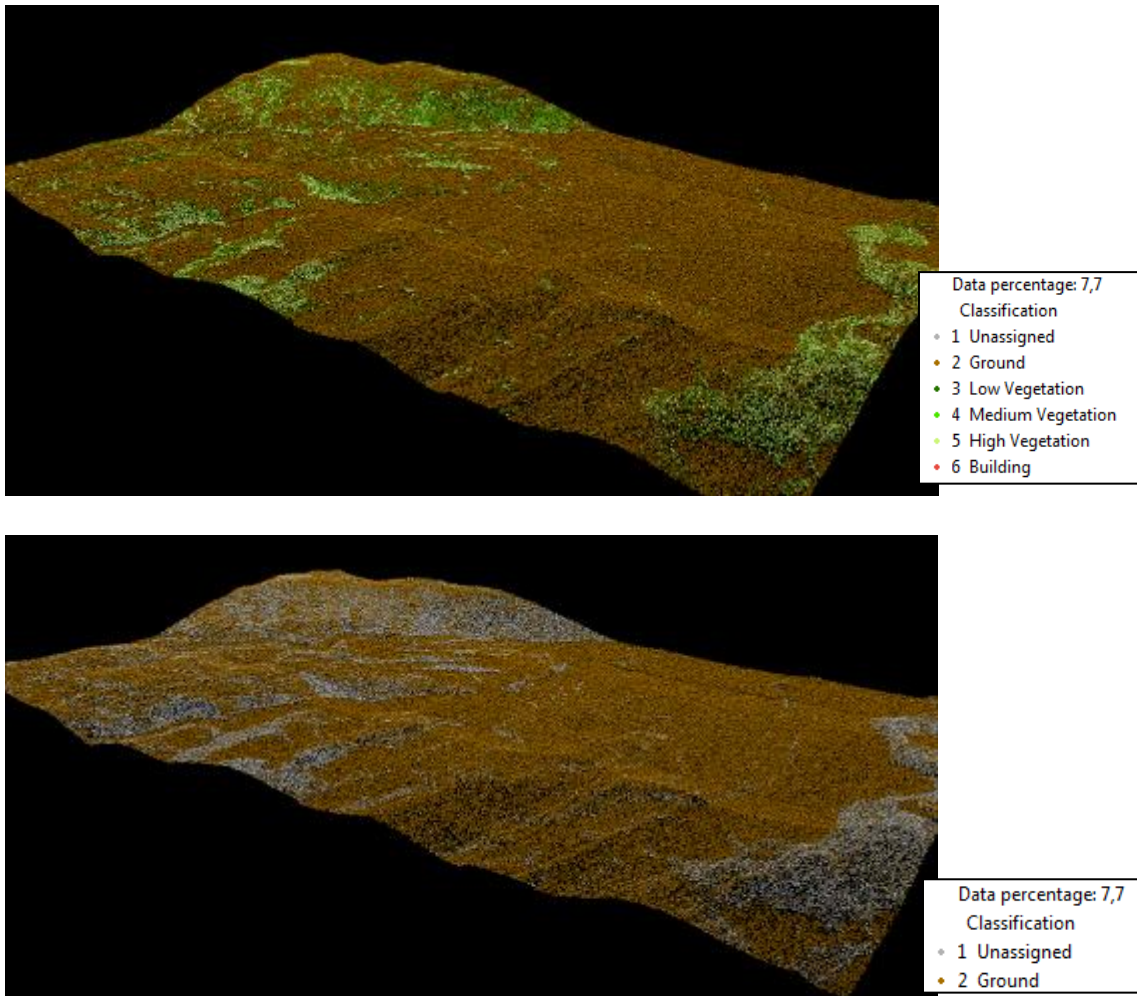


Fig. 3.8. Nube de puntos del incendio de Uncastillo. (a) Arriba: sin filtrar. (b) Abajo: filtrado.

b. Generación de modelos digitales de elevaciones

Los nuevos ficheros LAS categorizados en las dos grandes categorías suelo y no-suelo se integraron en nuevos archivos *LasDataset*, uno para incendio, para la generación del MDE con ArcGis. Para ello, se utilizó la herramienta ***Las Dataset to Raster (Conversion)***, seleccionando de la nube de puntos los retornos referentes a la clase *suelo* o "*ground*" y, de acuerdo a Montealegre *et al.* (2015), estableciendo una resolución para el MDE de 1 metro. El resultado fue la creación de modelos digitales de elevaciones para cada uno de los incendios con 1 m de resolución que constituyeron la base para los subsiguientes tratamientos.

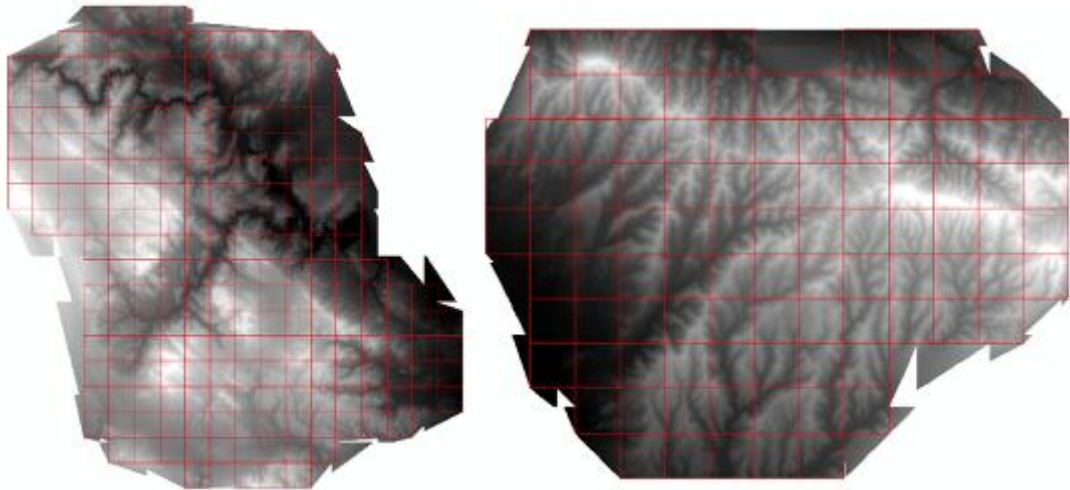


Fig. 3.9. Generación de MDEs de Requena (izquierda) y Uncastillo (derecha) a partir de información LiDAR.

c. Normalización de la nube de puntos LiDAR

El siguiente paso constituyó el proceso de normalización de las alturas a partir de los MDE generados para cada incendio con el fin de calcular las alturas de la vegetación a partir de los valores del MDE y no la altura a nivel de mar. Se realizó a través del programa FUSION en diversas fases.

La primera de ellas fue la conversión de los ficheros MDE a formato ASCII que requirió, a su vez, de dos procedimientos:

- i. El primero consistió en la separación de cada MDE en varias partes en cada uno de los incendios, para poder ejecutar la herramienta necesaria en FUSION. Para ello, se generaron nuevos ficheros SHP poligonales que fueron usados como máscaras envolventes para los cuadrantes LiDAR, abarcando no más de 20 mallas por limitaciones técnicas del programa FUSION, hasta completar la totalidad del incendio. Tras ello, se ejecutó la herramienta de ArcGis **Extract by Mask** para la separación de cada uno de los MDEs en función del SHP envolvente, almacenándolos en formato TIF.
- ii. El segundo se centró en la conversión de los MDEs generados en el paso anterior a formato ASCII (ASC). Para su procedimiento, se utilizó la herramienta **Raster to Ascii (Conversion)** de ArcGis, introduciendo como entrada los ficheros TIF y como salida el mismo fichero en formato ASC.

La segunda fase representó la conversión de los ficheros ASC en DTM a través de FUSION, ya que este último tipo de archivo es el soportado por el programa para la normalización de los modelos digitales de elevaciones y la estimación de las alturas de la vegetación. La conversión a este formato sólo puede realizarse a través de formatos ASC y, además, sólo permite hacerlo hasta un tamaño determinado de fichero; por este motivo, hubo que realizar todos los procedimientos anteriores. Al igual que el programa MCC-LiDAR, FUSION utiliza *scripts* para la ejecución de órdenes, por lo que hubo que elaborar un *script* para cada incendio a partir de ficheros *Batch*. El *script* comprende los siguientes parámetros: La llamada a la herramienta o ejecutable, en este caso el comando **ASCII2DTM**; el fichero de salida, en formato DTM; una sintaxis que incluye el sistema de referencia para las coordenadas xy y z ("m" en ambos casos: metros), el sistema de coordenadas ("1": UTM), el huso ("30" o "31", dependiendo del

incendio) y el dátum horizontal y vertical (cero en ambos casos: desconocido); y el fichero ASC de entrada. Como resultado, obtuvimos las alturas normalizadas a nivel de suelo de la nube de puntos y así se pudieron calcular las alturas de los retornos.

La tercera fase consistió en el recorte del modelo digital de elevaciones para las parcelas experimentales a partir de la función **Clip Data** de FUSION, usándose para ello los ficheros DTM anteriormente generados. Para ejecutar este comando fue necesario saber las coordenadas mínimas y máximas, tanto latitudinales (x) como longitudinales (y), de las parcelas y, además, en cuáles de las diferentes cuadrículas LiDAR (LAS) y de los ficheros DTM creados se encontraban incluidas. Así pues, hubo que realizar varios procedimientos.

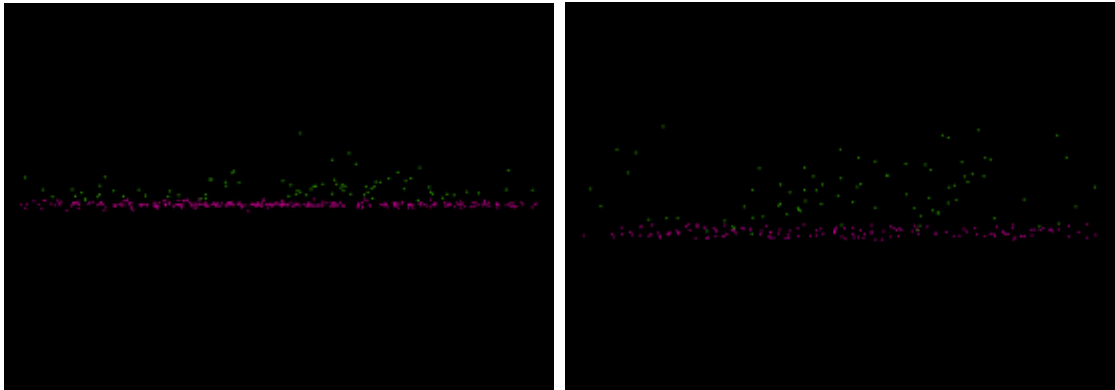


Fig. 3.10. Detalle de la nube de puntos recortada a dos parcelas experimentales

- i. El primer paso consistió en extraer de la capa SHP de las parcelas de estudio la información asociada a las coordenadas UTM, almacenada en los campos "x_local" e "y_local" y que representan la ubicación geográfica del centro de cada una de las parcelas. Como es necesario saber los valores "x" e "y" máximos y mínimos para acotar espacialmente la parcela, se identificó para cada una de ellas cuál era su radio a través de los datos almacenados en la base de datos, y esta cifra se le sumó o se le restó a cada valor "x_local" e "y_local" para establecer las coordenadas máximas y mínimas, respectivamente, tanto latitudinal como longitudinalmente. Con ello, se generaron finalmente cuatro valores: dos máximos ("x_max", "y_max") y dos mínimos ("x_min", "y_min"). Seguidamente, se utilizó la herramienta **Intersect** de ArcGis en el que se fusionaron las capas de las cuadrículas LiDAR y el fichero SHP de las parcelas con las coordenadas máximas y mínimas generadas, con el fin de saber en qué malla LiDAR (archivo LAS) estaba integrada cada una de las parcelas.
- ii. El segundo paso fue asociar cada uno de los ficheros DTM a las parcelas de estudio, basándose en las máscaras envolventes SHP creadas con anterioridad, que sirvieron para generar en última instancia los DTM. Se realizó a partir de la herramienta **Merge** de ArcGis, combinando el SHP envolvente con el SHP de las parcelas de estudio. De este modo, obtuvimos en una nueva capa vectorial información sobre las parcelas incluidas en cada SHP envolvente.
- iii. Para cada parcela, por tanto, se asoció su respectivo cuadrante LiDAR, el DTM al que pertenecen y se definieron las coordenadas "x" e "y" máximas y mínimas en función de su radio. Con esta información generada, se procedió a la creación y ejecución del *script* para la función **Clip Data** en FUSION, compuesto por los siguientes parámetros: La llamada a la herramienta o ejecutable, en este caso el comando **ClipData**, especificando el tipo de geometría del recorte o "shape" (en nuestro caso "shape: 1": circle); el modelo digital de

elevaciones en formato DTM asociado a la parcela, especificando que se desea convertir los puntos en alturas respecto al suelo ("height"); el fichero LAS sin los errores asociado a la parcela; el fichero LAS de salida (es decir, el recorte); y las coordenadas "x" e "y" mínimas y máximas. Se ejecuta a partir de un *Batch* y como resultado obtenemos tantos ficheros LAS como parcelas experimentales, calculadas las alturas de los puntos respecto del suelo para cada una de ellas.

d. Generación de estadísticos LiDAR

El último paso del tratamiento lo constituyó la generación de estadísticos para su posterior inclusión en el proceso de modelado, tanto para las parcelas experimentales como para la totalidad de los tres incendios de estudio.

Para las parcelas de estudio se trabajó con la herramienta *Cloudmetrics* de FUSION a partir de los recortes realizados en el paso anterior. Para ello, se tuvo en cuenta el radio de las parcelas puesto que cuanto menor fuera éste menos densidad de puntos existiría, pudiendo producir distorsiones en el proceso de modelado. Ello fue subsanado mediante la conversión de las parcelas de radios más bajas (de 1, 2 y 5) a parcelas de radio 10, quedando solamente este tamaño de parcela y las de radio 15, proceso realizado en el marco del proyecto SERGISAT. El *script* estuvo compuesto por los siguientes parámetros: La llamada a la herramienta o ejecutable, en este caso *Cloudmetrics*; los valores de referencia que se quieren extraer además de los estadísticos básicos, siendo éstos el número y porcentaje de pulsos superior a 4 m y el número y porcentaje de pulsos entre los valores 0,2 y 0,6, 2 y 4; y el fichero de salida en formato CSV. Los valores de altura seleccionados se propusieron para establecer una relación con la fracción de cabida cubierta (FCC) estimada en campo siguiendo los parámetros de altura establecidos por el modelo de combustible *Prometheus*. El resultado fue un fichero CSV con estadísticos para cada una de las parcelas experimentales y la inclusión de algunos de ellos como variables independientes en el proceso de modelado estadístico.

Para la totalidad del incendio se utilizó la herramienta *Gridmetrics* de FUSION a partir del modelo digital de elevaciones. El *script* realizado incluye la llamada al ejecutable, el fichero DTM y el archivo LAS asociado a éste para que los puntos establecieran como suelo el modelo digital de elevaciones. Se estableció una altura mínima para la nube de puntos de 0,2 con el fin de evitar la introducción de retornos de "suelo" en la nube de puntos y por ser este valor el error altimétrico medio de los datos LiDAR-PNOA. Asimismo, se precisó una resolución de 30 metros de píxel. El resultado fue la generación de estadísticos en archivos CSV agrupados por las cuadrículas LiDAR de cada incendio, siendo después extraídos algunos de ellos mediante *Csv2Grid* de FUSION para su posterior espacialización.

3.2.4. Modelado estadístico

Se empleó un análisis discriminante predictivo, con el fin de estimar mediante los datos de campo y LiDAR los valores de las diferentes variables pero para los que se desconoce su grupo. Es decir, a partir de nuestra muestra (las parcelas experimentales) se formuló un algoritmo que determinó a qué modelo de combustible pertenecía una nueva variable situada fuera de las parcelas experimentales, es decir, en la totalidad del incendio, a partir de la información de campo y LiDAR.

En este contexto, la variable dependiente lo constituyó el modelo de combustible estimado en campo y revisado posteriormente en gabinete, dándose la presencia de todos los modelos

excepto del tipo 1 (propagación en herbáceas). Por su parte, la selección de las variables independientes obedeció a su importancia como factores explicativos de los diferentes modelos de combustible. Estas variables procedieron de la información de campo y fue apoyada por los estadísticos LiDAR que se generaron para cada una de las parcelas (*Clip Data*) en función de diferentes tramos altimétricos (*Cloudmetrics*) que reproducen los de la FCC del campo y otras variables como el porcentaje de retornos superiores a 4 m o la desviación estándar.

La variable dependiente (modelo de combustible) fue objeto de diversos ajustes realizados en gabinete de manera que se aproximara a la realidad de las parcelas, tanto por el aspecto visual de las mismas como por la información recogida en campo. Por otra parte, para las variables independientes se realizó un análisis estadístico previo paso a su modelado, obteniendo estadísticas básicas como la media, la moda, la mediana y la desviación estándar, con el fin de comprobar la existencia de correlaciones con los modelos de combustible. Aquellas con mayores *outliers*, es decir, valores aislados que se alejaban de la distribución, fueron reanalizadas y, algunas de ellas, finalmente desestimadas, al no ser explicativas del modelo de combustible. En este sentido, el análisis previo de los datos fue de gran ayuda ya que ayudó a ajustar mejor las variables independientes a introducir. Por tanto, en un primer momento se decidieron que estas variables lo constituirían la fracción de cabida cubierta (FCC), la pedregosidad, las alturas de los árboles y su densidad en función del radio de la parcela, el porcentaje de pies (árboles) mayores de 4 m y la densidad de los árboles regenerados. Algunas de estas variables, como las que se refieren a la densidad, no fueron obtenidas directamente la base de datos sino que hubo que realizar una serie de cálculos entre las diferentes variables.

Los modelos estadísticos se validaron utilizando el método de la validación cruzada o *cross-validation*, que se basa en la comparación de las variables explicativas a partir de la partición de la muestra en datos de test y de entrenamiento. Una de las técnicas de este método estadístico es la *k-fold*, dado que es de mayor utilidad cuando el conjunto de datos es pequeño (Yang y Huang, 2014) y porque utiliza todos los datos para el entrenamiento, de manera que se obtienen resultados a priori más representativos (Pérez-Planells *et al.* 2015). Por ello, este estudio se basó en esta técnica, realizándose 4 iteraciones que dejaron fuera cada vez 10 parcelas de entrenamiento para su posterior validación final. Los modelos se ejecutaron a través del entorno R y todos ellos fueron de clasificación, haciéndose pruebas con los modelos no paramétricos *Random Forest (RF)* y *Support Vector Machine (SVM)* mediante la técnica de validación cruzada *k-fold*. Las modelizaciones iniciales obtuvieron para los coeficientes *Accuracy* y *Kappa* valores que no explicaban más del 60% de los modelos, tanto en RF como en SVM, por lo que fue necesario realizar diversos ensayos añadiendo, eliminando y/o combinando las variables independientes seleccionadas en primera instancia. Ello necesitó de otro análisis estadístico de las mismas para reducir el margen de error y obtener una mayor significación.

Finalmente, al conseguir la mejora de los valores de ambos coeficientes, el modelo quedó establecido por las siguientes variables:

- **Variable dependiente:** Modelo de combustible (campo).
- **Variables independientes:** FCC del estrato arbóreo (> 5 m), FCC del estrato arborescente (3-5 m), FCC del estrato arbustivo (1-3 m), FCC del estrato subarbustivo (<1) y desviación típica de la altura de los retornos; los cuatro primeros procedentes del campo y el último de los estadísticos LiDAR extraídos para cada parcela.

3.2.5. Espacialización y generación de cartografías

La última fase del proceso metodológico lo constituyó la espacialización del modelo estadístico y la generación de las cartografías de modelos de combustibles. La espacialización se generó mediante datos de campo e información LiDAR para las parcelas de campo y para el conjunto de las masas de *Pinus halepensis* de los tres incendios forestales. De esta manera, se obtuvo la predicción del modelo de combustible. La fase de espacialización estuvo dividida en tres partes.

La primera consistió en la generación de estadísticos LiDAR, algunos de los cuales ya habían sido extraídos en la última fase del tratamiento LiDAR con *Gridmetrics* y *Csv2Grid*. Esta vez, se necesitó obtener la información de la nube de puntos a diferentes alturas para los tres incendios forestales, de forma que coincidieran con las utilizadas en el modelo estadístico procedentes del campo. Se ejecutó mediante la herramienta *Gridmetrics* de FUSION que permitió extraer los tramos de altura que se le indicó en el *script* de la nube de puntos (ver más abajo) en valores brutos de los retornos que posteriormente serían relativizados con el total de retornos para todas las alturas. Como resultado, obtuvimos tantos ficheros CSV como cuadrículas LiDAR incluidas en cada incendio con los tramos de altura según el crecimiento natural del *Pinus halepensis* en el periodo transcurrido desde la toma de los datos LiDAR (2009-10) hasta los de campo (2017). De este modo, los tramos establecidos trataron de ajustarse a los de la FCC, reduciendo en 25 cm el tramo máximo entre el estrato arbustivo y el arborescente, y en 50 cm el tramo máximo entre este último y el estrato arbóreo, según indican las tablas de crecimiento del Inventario Forestal Nacional (IFN) así como modelos de crecimiento para el *Pinus halepensis* generados por la empresa *Föra* en el marco de colaboración con el grupo GEOFOREST. Ello dio como resultado los siguientes tramos: 0,2 – 1 m: estrato subarbustivo; 1 – 2,75 m: estrato arbustivo; 2,75 – 4,5 m: estrato arborescente; más de 4,5 m: estrato arbóreo. También se extrajo la cantidad total de puntos de cada cuadrícula.

La segunda fase consistió en la extracción de los estadísticos LiDAR, tramo por tramo, para su rasterización. Se realizó mediante *Csv2Grid* de FUSION a los CSV generados por *Gridmetrics* que fueron almacenados en formato TIF, dando como resultado tantos ficheros TIF como cuadrículas posee cada incendio, para cada tramo altimétrico establecido y para la totalidad de puntos. Además, se usó el estadístico de la desviación estándar para la totalidad de los incendios forestales, obtenido anteriormente, dado que representó la variable independiente LiDAR que se introdujo en los modelos estadísticos como explicativa del modelo de combustible. Cada uno de estos ficheros fue fusionado posteriormente en uno sólo por cada estadístico utilizado mediante la herramienta *Mosaic To New Raster* de ArcGIS. De esta manera, quedaron un total de 6 ficheros en formato ráster para cada uno de los tres incendios.

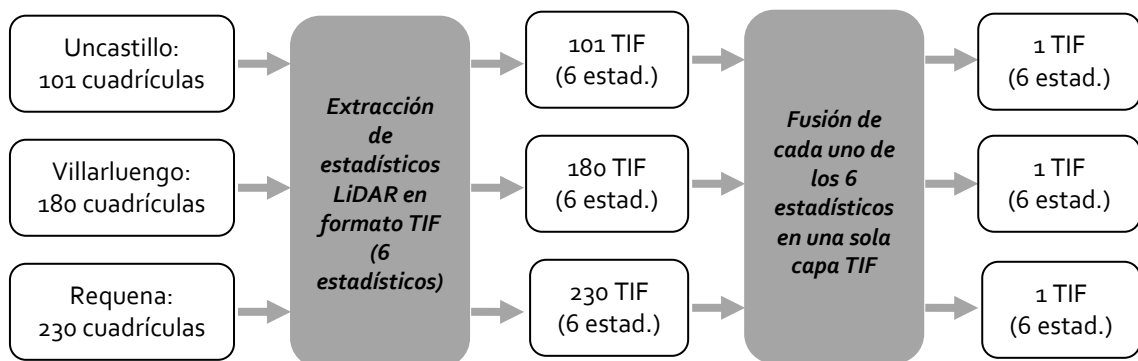


Fig. 3.11. Diagrama de la extracción de los estadísticos LiDAR para su espacialización

La tercera y última fase fue la propia espacialización del modelo estadístico, realizado mediante R-Studio. De los 6 ficheros ráster (TIF) generados, 5 fueron introducidos como variables en el modelo (todos excepto la nube total de puntos). Este último fue usado para convertir los valores de los retornos de brutos a porcentuales para cada tramo altimétrico establecido, con el fin de relativizar la información en la totalidad del área de estudio. Estas variables LiDAR se combinaron con sus respectivas usadas en el modelo de clasificación, permitiendo de esta manera espacializar el modelo desde las parcelas experimentales a la totalidad del área incendiada y colindante, dando como resultado 3 ficheros ráster para cada una de las áreas de estudio, con una resolución de 30 m de píxel que contenían un código número asignado (del 2 al 7) que se corresponde con el modelo de combustible asignado, en función de la predicción del modelo estadístico

Por su parte, durante la elaboración de las cartografías finales de modelos de combustible, se tuvo en cuenta que la espacialización era sólo significativa en las áreas dominadas por *Pinus halepensis*, por lo que los ficheros ráster se combinaron con la información del Mapa Forestal de España (EFN50) para determinar la distribución de esta especie en los incendios y, con ello, los modelos de combustible asociados a esas zonas, dejando menos visible el resto de zonas. Por último, hubo que realizar tareas de suavizado de los píxeles mediante la herramienta **Boundary Clean** o *refinado de límites* de ArcGis, ya que en la generación de la cartografía aparecieron píxeles aislados con un determinado modelo de combustible que no se correspondía con la realidad de la propagación del fuego.

3.3.6. Dificultades surgidas durante el proceso metodológico

Hay que destacar que en cada una de las fases metodológicas surgieron una serie de obstáculos que fue preciso solventar en el desarrollo del trabajo. En algunos casos, estos problemas pudieron ser solucionados en un intervalo corto de tiempo; otros, sin embargo, propiciaron la reelaboración de todo el proceso metodológico.

En los datos de campo, el mayor de los problemas estuvo relacionado con el modelo de combustible, pues se trata de una estimación realizada en campo en función de la FCC, de la vegetación existente y de la continuidad o no entre los estratos. Aunque posteriormente se revisó en gabinete a partir de fotografías y de los datos inventariados, hubo que realizar un análisis estadístico de las variables de la FCC para corregir posibles errores en la toma de datos. Ello implicó hacer uso de estadísticos básicos como la media y la desviación estándar, comprobando en qué parcelas aparecían *outliers* para su posterior revisión. Gracias a estos análisis pudieron corregirse algunos casos discordantes en la estimación de los modelos de combustible.

Respecto a los datos LiDAR, uno de los principales problemas estuvo asociado a la presencia de errores altimétricos o de precisión de las coordenadas x,y en la nube de puntos. Ya ha sido comentado el caso de la clase 12 (*solape*) en el que fueron detectados alturas en la nube de puntos que no se correspondían con la realidad, por lo que se decidió eliminarla para que en los subsiguientes procesos no se generaran errores. El resto de clases también fue sometido a análisis pero, en un principio, no se detectaron fallos por lo que se continuó trabajando en las siguientes fases. Sin embargo, a la hora de espacializar las cartografías finales, se detectaron varias franjas con una alta densidad de puntos que no se ajustaban a la realidad de la superficie. Se procedió a comprobar nuevamente las clases, detectándose cierta relación entre la clase 1 (*unnasigned*) y la anormal densidad de retornos. Este hecho sucedía en los tres incendios forestales, por lo que esta clase tuvo que ser extraída y comenzar de nuevo todo el tratamiento de los datos LiDAR sin esta categoría.

En el modelado estadístico hubo que seleccionar minuciosamente las variables y plantear diferentes propuestas para que el modelo fuera lo más veraz posible. Se planteó la posibilidad de normalizar las variables pero se desestimó porque muchas de ellas ya estaban expresadas en porcentaje (la propia FCC, por ejemplo). Como se ha explicado, fue necesario realizar un análisis estadístico previo de las variables introducidas en el modelo para comprobar cuáles eran las que mejor se ajustaban. Esto fue complicado, sobre todo, por la información LiDAR, ya que hubo que extraer de los estadísticos una gran cantidad de tramos de altura para estudiar cuáles eran los más explicativos. Los análisis hechos a las variables LiDAR fueron similares a las que se realizaron para las de campo, siendo esencial la detección de *outliers* para desestimar una variable como representativa.

Durante la espacialización del modelo, surgieron problemas relacionados con la herramienta *Density Metrics* de FUSION, ya que las capas ráster finales mostraban los bordes de las teselas LiDAR, lo que rebajaba sustancialmente la calidad de las cartografías. Ello se debió a que los estadísticos que genera esta función son por cuadrícula, generando un espacio vacío entre ellas que se ve reflejada en las rasterizaciones posteriores. Para su solución, se planteó aplicar un *switch* a la herramienta para que los estadísticos no se redujeran a la tesela sino que abarcaran también parte de las adyacentes (generación de un *buffer*) y que, de esta manera, no hubiera un corte brusco entre ellas. Finalmente, se decidió utilizar la herramienta *Gridmetrics* que permite obtener los mismos resultados aunque la labor de procesado y rasterización fue mayor.

4. Resultados

4.1. Análisis de los datos de campo

Los modelos de combustible estimados en campo a cada parcela fueron los que se reflejan en la tabla 4.1, mientras que la tabla 4.2 muestra la cantidad total de parcelas con un mismo modelo de combustible.

Tabla 4.1. Modelos de combustible asignados en campo a cada parcela experimental

PARCELA EXP.	MOD. COMB <i>Prometheus</i>	PARCELA EXP.	MOD. COMB <i>Prometheus</i>	PARCELA EXP.	MOD. COMB <i>Prometheus</i>
R01	6	R41	6	R97	4
R02	6	R42	4	R98	7
R03	7	R43	5	R99	2
R04	4	R44	4	U13	3
R05	7	R45	4	U14	4
R06	7	R46	4	U15	5
R07	2	R48	7	U26	5
R08	4	R49	4	U27	6
R09	6	R50	3	U28	4
R10	3	R51	7	V09	7
R11	2	R52	7	V10	7
R12	2	R54	3	V11	5
R13	2	R55	6	V12	2
R14	3	R59	7	V13	3
R15	4	R60	4	V14	3
R16	4	R61	4	V15	2
R17	4	R68	3	V16	2
R18	6	R69	2	V36	4
R19	6	R70	7	V37	3
R36	6	R71	7	V38	3
R37	7	R73	6	V39	3
R38	6	R74	7	V40	2
R39	3	R75	3	V41	7
R40	5	R96	7	V42	5
				V43	6

Tabla 4.2. Cantidad de parcelas por cada tipo de modelo de combustible

Modelo de combustible <i>Prometheus</i>	Cantidad total de parcelas
2	10
3	13
4	16
5	6
6	12
7	16

Los resultados arrojan una relativa homogeneidad en la cantidad de parcelas con un determinado modelo de combustible, si bien la de tipo 5 es la de menor presencia debido a que se trata de un modelo de propagación del fuego en árboles pero sin sotobosque asociado, situación que no suele producirse en las masas de *Pinus halepensis*. De hecho, la habitual acumulación de biomasa en el sotobosque que acompaña a esta especie propicia que haya una mayor cantidad de parcelas con modelos de combustible de tipo 4 y de tipo 7, que se relacionan, además, con las parcelas situadas en zonas de incendio (masas en regeneración) y en zonas limítrofes, respectivamente.

Por otro lado, las estadísticas básicas para las variables independientes utilizadas en el modelo, así como de otras de interés que no fueron incluidas, se exponen en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Estadísticas básicas de las variables de campo (selección)

	Mínimo	Máximo	Rango	Mediana	Media	Desviación típica
FCC Estrato 5	0	95	95	10	22,74	22,93
FCC Estrato 4	0	85	85	35	37,96	19,43
FCC Estrato 3	2	100	98	30	35,81	25,06
FCC Estrato 2	0	100	100	15	20,55	22,39
FCC Estrato 1	0	85	85	15	27,10	29,69
Pedregosidad (%)	0	95	95	7	18,33	24,60
Pies > 4 m (%)	0	100	100	42,11	44,59	36,80

Los resultados nos permiten observar la elevada desviación típica existente tanto en la FCC del estrato 1 (herbáceas y matorrales) como en el porcentaje de pies mayores de 4 m. Por ello, las variables recogidas que mejor se relacionaron con el modelo de combustible fueron los estratos 5 (arbóreo), 4 (arborescente), 3 (arbusivo) y 2 (subarbusivo) de la FCC. En la figura 4.1 se reproducen los diagramas de caja o *boxplots* de la presencia de cada una de estas variables en función de su relación con la variable dependiente, observándose cierta coherencia en función de las alturas establecidas por cada modelo de combustible y las de los estratos de la FCC.

De esta manera, el modelo *Prometheus* de tipo 2 presenta una disminución progresiva de la FCC cuanto más elevados son los estratos, mientras que en el de tipo 3 la presencia es importante en los dos estratos más inferiores. Por su parte, el de tipo 4 presenta las mayores FCC en el estrato arborescente, lo que guarda relación con la continuidad desde los estratos arbusivos hacia los arbóreos propios de este modelo. Para los modelos de propagación en árboles, todos presentan una FCC importante en el estrato arbóreo, diferenciándose entre ellos en que el modelo de tipo 5 cuenta con una importante FCC del estrato subarbusivo y escaso del arbusivo, mientras que el de tipo 6 posee con una mayor presencia de arbustos, y el de tipo 7 cuenta una FCC importante en casi todos los estratos.

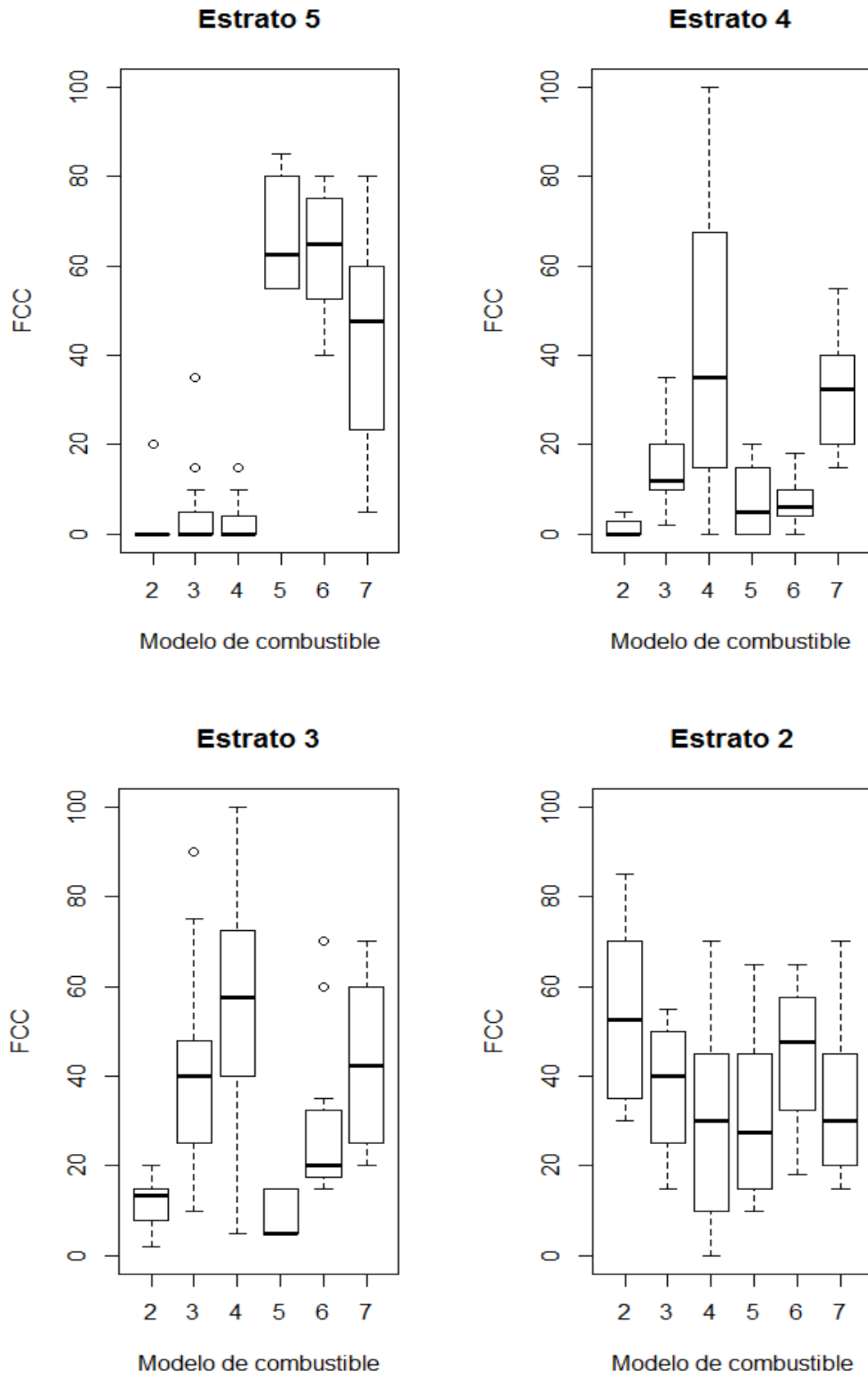


Fig. 4.1. Diagramas de caja (*boxplots*) de las variables independientes obtenidas en campo

4.2. Explotación de la base de datos

Los resultados de la implementación de los datos de campo de las parcelas de estudio en la base de datos se reproducen en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Cantidad total de datos de campo introducidos en la base de datos

Incendio forestal	Nº de parcelas	Nº de especies florísticas	Nº de árboles > 2 m	Nº de árboles regenerados
Uncastillo	6	117	392	4
Villarluengo	16	266	985	381
Requena	51	971	2.826	751
Total	73	1.354	4.203	1.136

Cabe señalar que los datos del número de especies florísticas no refieren a la cantidad de especies distintas, sino a la totalidad de especies introducidas en la base de datos, sin importar que éstas que se repitan. Es decir, el valor muestra los datos de las especies florísticas existentes en cada una de las parcelas. Por su parte, el número de árboles tanto mayores de 2 m como menores (regenerados) se refiere a la cantidad de pies existente en las parcelas y no a los árboles tipo inventariados.

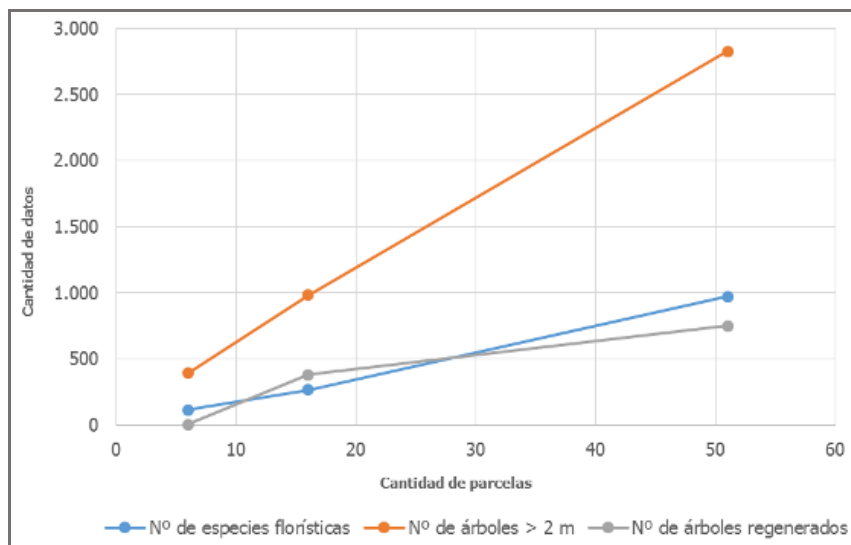


Fig. 4.2. Relación entre el número de parcelas y el de los datos de campo introducidos

La figura 4.2 pretende mostrar la proporción de los datos introducidos en función de la cantidad de parcelas experimentales para cada incendio. Cada uno de los puntos constituye el número de parcelas, identificando así a Uncastillo en la izquierda (6 parcelas), Villarluengo en el centro (16) y Requena en la derecha (51). Se observa que el número de árboles sigue una pendiente homogénea por lo que se deduce una relación entre ambas variables. Por otro lado, la cantidad de árboles regenerados en Requena sigue una línea menos pendiente que las de los otros dos incendios, demostrando con ello la existencia de una menor cantidad de datos al respecto por la ausencia de estas variables recogidas en campo; es decir, una menor cantidad de árboles regenerados que en otros incendios de manera proporcional al número de parcelas exploradas. En el caso de las especies florísticas inventariadas sucede lo contrario al caso anterior, ya que hay menor pendiente en Villarluengo que en Requena.

4.3. Análisis de las variables LiDAR

Como ya ha sido mencionado, algunas de las métricas LiDAR fueron usadas como variables independientes para apoyar los datos procedentes de campo durante el modelado estadístico. La tabla 4.5 recoge las estadísticas básicas para algunas de estas variables.

Tabla 4.5. Estadísticas básicas de las variables LiDAR (selección)

	Mínimo	Máximo	Rango	Mediana	Media	Desviación típica
Retornos < 0,20 m	0,02	0,96	0,94	0,61	0,51	0,28
Retornos < 0,60 m	0,00	0,71	0,71	0,13	0,18	0,17
Retornos < 1,75 m	0,00	0,56	0,56	0,15	0,17	0,13
Retornos < 3,50 m	0,00	0,41	0,41	0,01	0,06	0,09
Retornos > 3,50 m	0,00	0,57	0,57	0,00	0,08	0,12
Desviación típica de la elevación de los retornos	0,18	4,71	4,53	0,69	1,48	1,37

Los tramos de altura de los retornos o nube de puntos fueron establecidos siguiendo las alturas de los tres principales modelos de propagación según *Prometheus*, pero adaptado a la situación de campo en la actualidad teniendo en cuenta el crecimiento vegetal de *Pinus halepensis* en los años transcurridos desde que se tomaron los datos LiDAR (2009-10) y el inventario de campo (2017). Por su parte, la desviación típica de la elevación de los retornos representó la variable introducida en el modelo de estimación junto con los datos de campo anteriormente mencionados.

Los diagramas de caja para estas variables se exponen en la figura 4.3 y vienen a explicar la dominancia de la FCC, esta vez a partir de los retornos LiDAR, en función de diferentes tramos altimétricos. Así pues, se observa que para el modelo *Prometheus* de tipo 2 dominan los retornos por debajo de 1,75 m (especialmente por debajo de los 0,60 m), mientras que apenas hay retornos en alturas de la nube de puntos superiores. Por su parte, el tipo 3 presenta valores similares excepto por el incremento que existe de los retornos por debajo de los 3,50 m. En el de tipo 4, se produce un aumento progresivo de los retornos a medida que la altura crece hasta los 3,50 m, tramo a partir del cual no hay apenas datos para estos tres modelos de propagación en arbustos. Para los de propagación en árboles, vuelve a producirse una situación similar que en los *boxplots* de las variables FCC de campo. En el tipo 5, hay una gran cantidad de datos en retornos menores de 0,60 m, descendiendo progresivamente hasta que aumenta en alturas superiores a 3,50 m. Los de tipo 6 y 7 presentan comportamientos similares de las diferentes alturas, si bien la última se caracteriza por tener una mayor variabilidad de los datos.

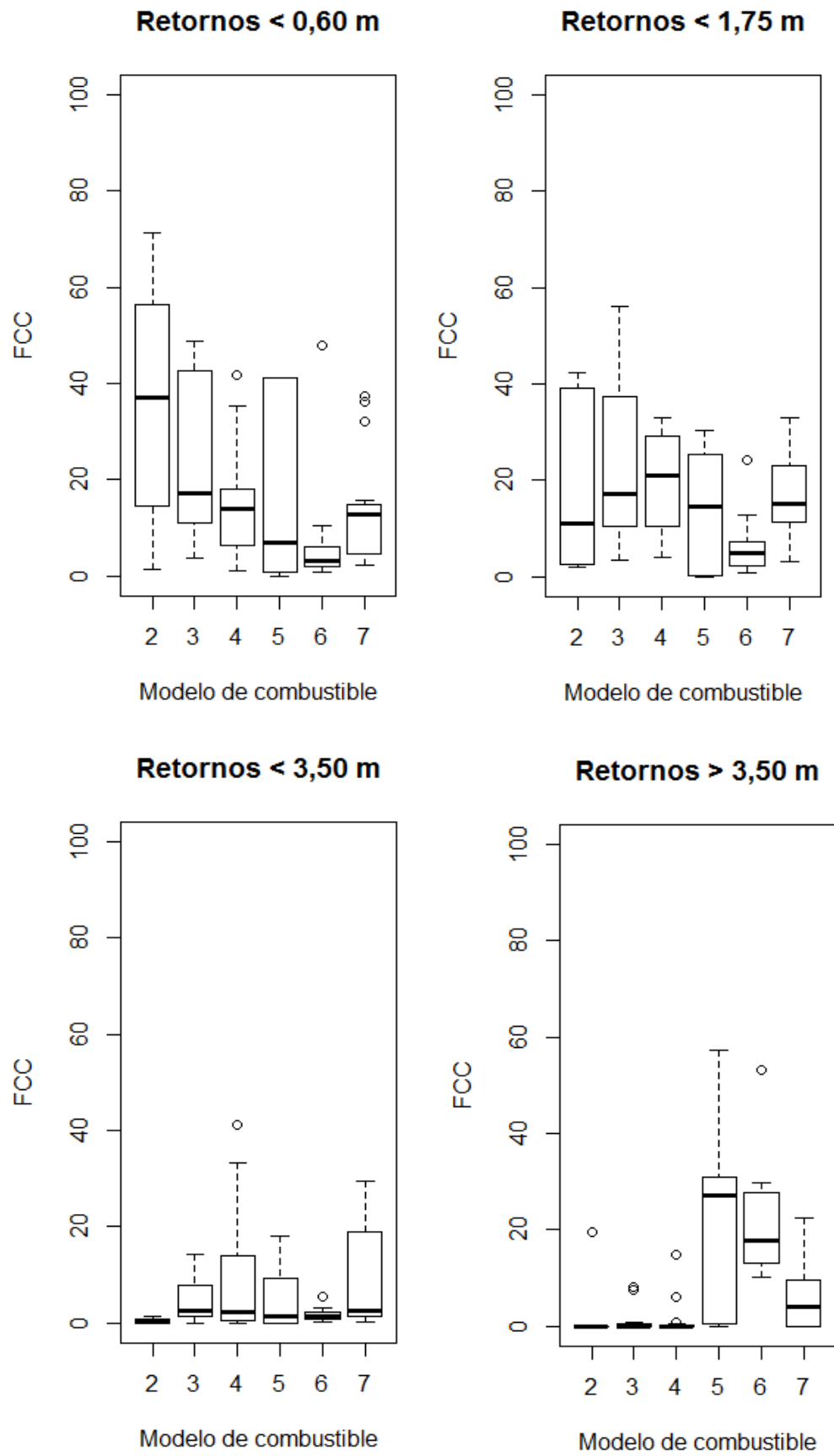


Fig. 4.3. Diagramas de caja (*boxplots*) de variables LiDAR

4.4. Modelado del combustible forestal

Durante la fase de validación se generó la matriz de confusión, que se basa en la creación de una matriz cuadrada con tantas filas y columnas como modelos de combustible hay introducidos, obteniendo las siguientes predicciones:

Tabla 4.6. Matriz de confusión de los modelos de combustible

Modelo combustible		Observado					
		2	3	4	5	6	7
Estimado	2	10	1	0	0	0	0
	3	0	8	2	0	0	0
	4	0	4	13	0	0	2
	5	0	0	0	5	0	0
	6	0	0	0	1	11	1
	7	0	1	1	0	1	13

Los resultados (tabla 4.6) indican el modelo de combustible estimado y observado en función de la FCC de los estratos arbóreo, arborescente, arbustivo y subarbustivo, y de la desviación típica de la elevación de los retornos de la nube de puntos LiDAR; es decir, si existe relación entre la variable dependiente y las independientes.

Por su parte, la tabla 4.7 refleja los valores de los coeficientes empleados en el modelado geoestadístico.

Tabla 4.7. Resultados de la predicción de los modelos

Modelo	Variable dependiente	Variables independientes	Entrenamiento		Validación <i>k-fold</i>	
			Accuracy	Kappa	Accuracy	Kappa
<i>Random Forest (RF)</i>	Modelo de combustible <i>Prometheus</i>	EST ₅ , EST ₄ , EST ₃ , EST ₂ de la FCC (campo).	1	1	0,6739	0,6015
<i>Support Vector Machine (SVM)</i>		Desviación típica elevación de los retornos (LiDAR)	0,8904	0,8662	0,6821	0,6124

Los datos de validación arrojan valores de estimación de los coeficientes *Accuracy* y *Kappa* similares en ambos modelos, si bien son ligeramente superiores en el modelo SVM.

Finalmente, se optó por modelar a partir de SVM por poseer coeficientes de predicción superiores a los de RF y por constituir, como ya se ha mencionado, un modelo no paramétrico que se ajusta de forma más fidedigna a nuestra muestra de estudio por el relativo pequeño tamaño de la misma. Por tanto, se puede establecer que se han estimado los modelos de combustible con un 68% de exactitud utilizando los distintos estratos de la FCC y la desviación típica de los retornos LiDAR.

4.5. Representación cartográfica de los modelos de combustible

A partir de los resultados de los modelos predictivos y de su espacialización, se han elaborado tres cartografías de modelos de combustible, una para cada incendio. Éstas se muestran de manera completa y a mayor resolución en los anexos finales.

Dado que los datos de campo han sido tomados de acuerdo a las masas de *Pinus halepensis*, en las representaciones cartográficas estos sectores aparecen resaltados respecto al resto del área incendiada, con otro tipo de vegetación dominante y que son mostrados con transparencia en la cartografía (sobre el modelo digital de elevaciones). En general, se percibe un predominio claro de los modelos de propagación en matorrales y arbustos (tipos 2, 3 y 4), con algunos sectores en los que destacan los modelos de propagación en árboles, en especial los tipos 6 y 7, con poca representación del tipo 5. Asimismo, se ha querido reflejar la ubicación de los núcleos de población del área delimitada por el incendio y del adyacente como forma de examinar la intensidad del riesgo por incendio forestal para las poblaciones.

La figura 4.4 representa el mapa de modelos de combustible para el incendio de Uncastillo.

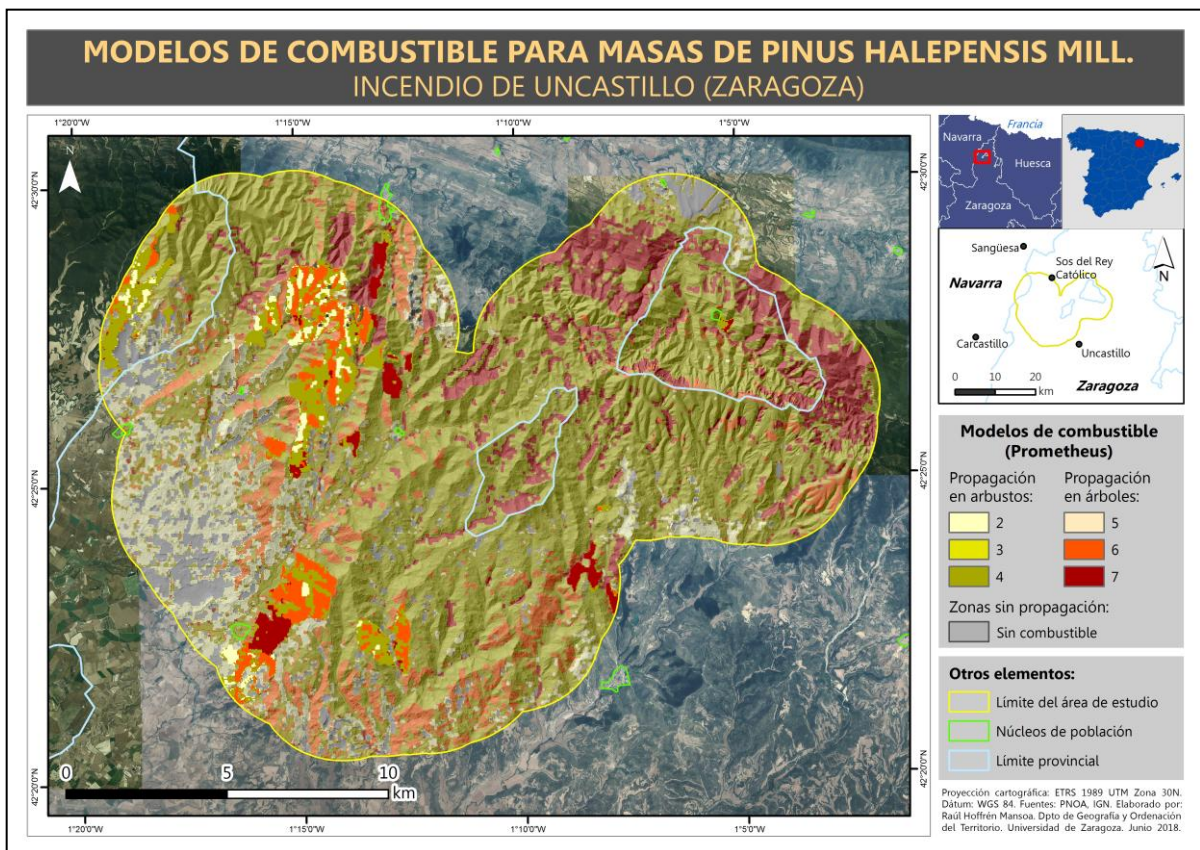


Fig. 4.4. Mapa de modelos de combustible en el incendio de Uncastillo

Se observa que el grupo de modelos de combustible más abundante es el que agrupa los de tipo arbustivo y matorral (grupos 2, 3 y 4), especialmente el de tipo 4 que se caracteriza por la continuidad de los estratos en altura, pero sin la existencia de estratos arbóreos dominantes en el terreno. En los sectores de *Pinus halepensis* el dominio no es tan claro, excepto en algunos sectores ubicados en el centro del incendio, donde se combina el modelo tipo 4 (arbustos con continuidad en altura) con el de tipo 2 (de tipo subarbustivo y de matorrales), que indican la presencia de árboles en proceso de regenerado. El modelo de tipo 7 domina en

cuatro sectores de *Pinus halepensis*, lo que indica la existencia de masas de gran altura y con sotobosque importante.

En el incendio de Villarluego (figura 4.5) se perciben dos sectores de *Pinus halepensis* dominados claramente por modelos de propagación en árboles, uno de gran extensión situado en la parte norte-noreste y otro en el sector occidental, en el entorno del municipio de Villarluego. Por su parte, en la zona centro dominan los de tipo arbustivo y de matorral evidenciando una mayor presencia de regenerado en este sector. En la totalidad del incendio, el dominio del modelo de tipo 4 es claro, seguido del tipo 7, es decir, estamos ante un espacio forestal donde existe una continuidad en los estratos forestales. Asimismo, destaca la ausencia del modelo de combustible de tipo 5 en las áreas de *Pinus halepensis*.

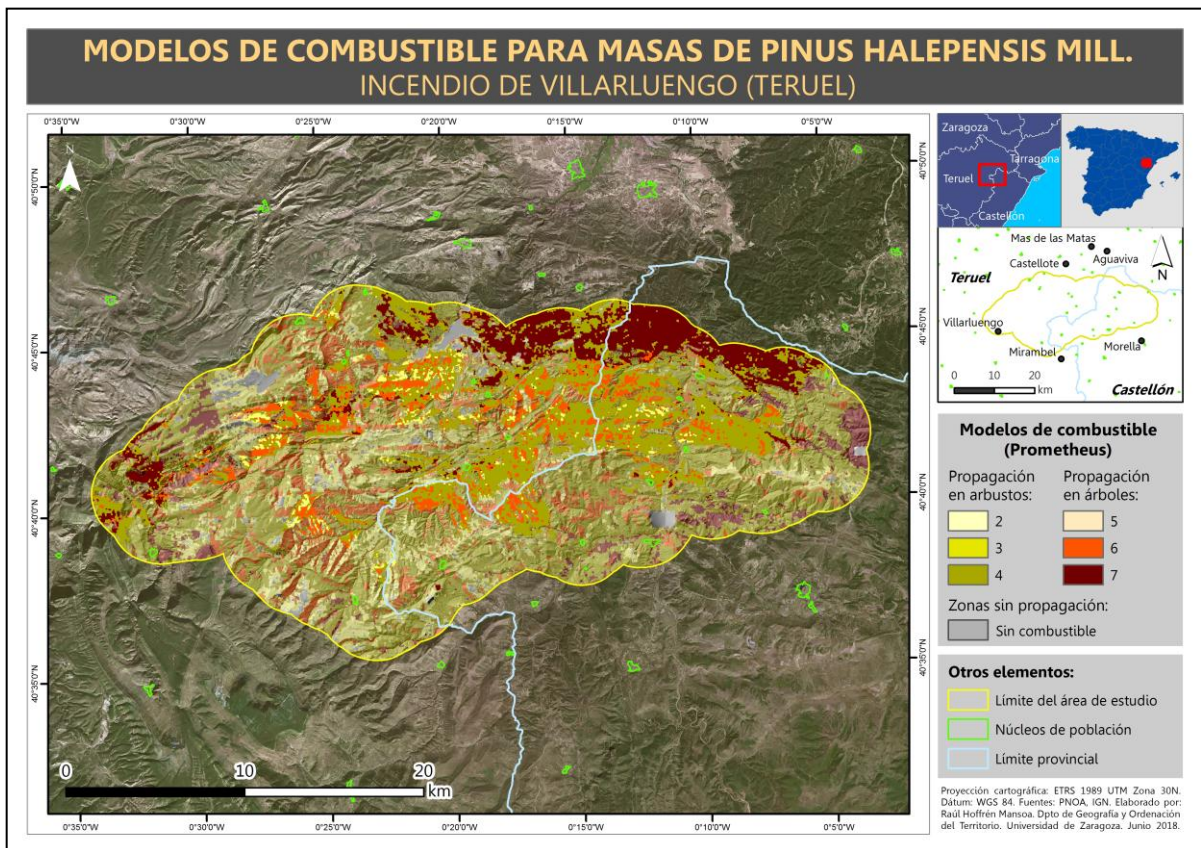


Fig. 4.5. Mapa de modelos de combustible en el incendio de Villarluego

En el incendio de Requena (figura 4.6) se repite la dominancia del modelo 4 aunque hay una mayor presencia de los modelos de propagación en árboles 6 y 7, en especial en las zonas noroccidentales del incendio, coincidiendo con las parcelas de control que no fueron afectadas por grandes incendios forestales de 1994. En las zonas quemadas predomina el tipo 4, representando las áreas de regenerado, aunque se da la existencia de sectores con modelos de tipo 6 y 7 en el que la masa arbórea es ya importante.

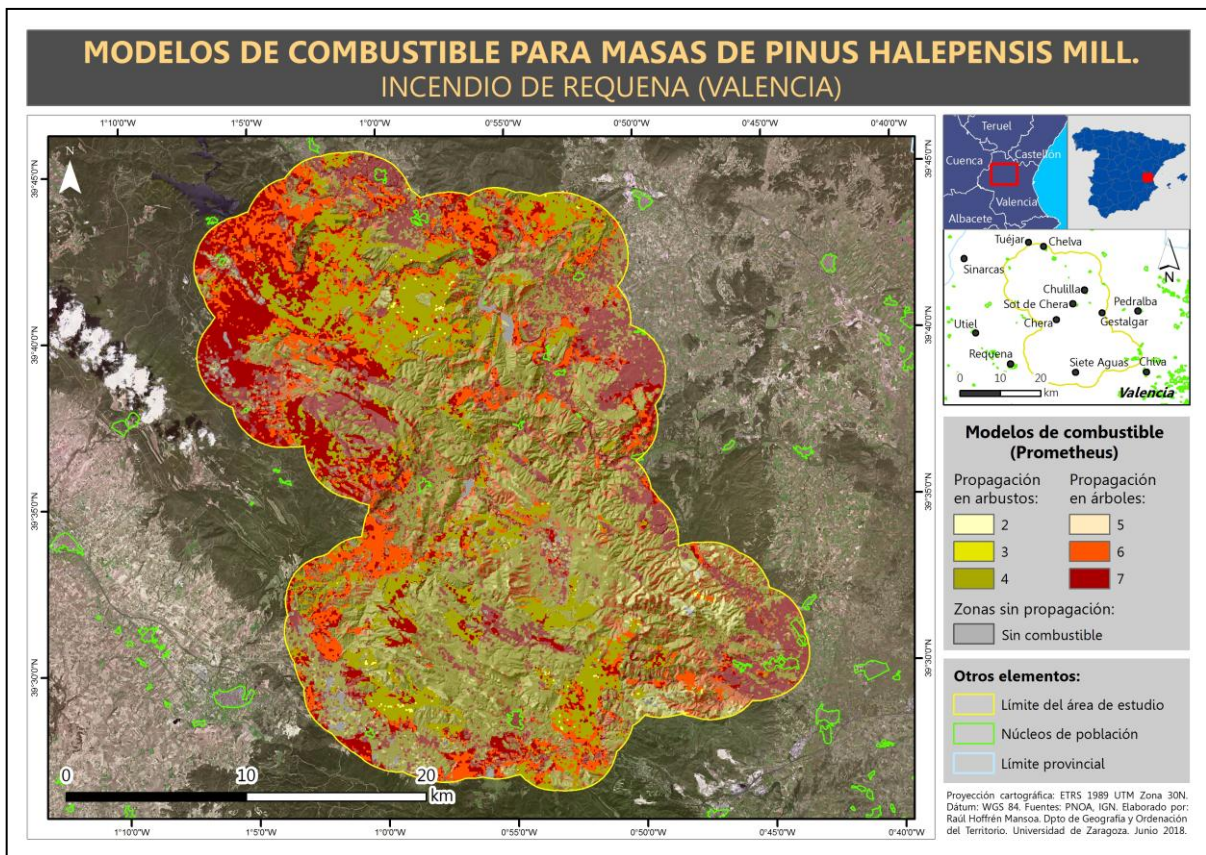


Fig. 4.6. Mapa de modelos de combustible en el incendio de Requena

Comparando los mapas, se pueden evidenciar algunas similitudes y diferencias. En los tres incendios y sin acotarlo a las parcelas de *Pinus halepensis*, los modelos de combustible más representados son los de propagación por abundante biomasa vegetal tanto en extensión como, sobre todo, en altura. En las zonas de nuestra especie objeto de estudio, el gran dominador es el modelo 4 en los incendios de Villarluengo y Requena, mientras que en Uncastillo dominan los modelos 6 y 7 con determinados sectores de tipo 2. No obstante, es importante la presencia de estos dos últimos modelos en las áreas de control, situados en los sectores más exteriores del área de estudio, tanto en Villarluengo como en Requena

5. Discusión

Tras la exposición de los resultados, se plantean diferentes cuestiones relacionadas con el proceso metodológico empleado en el presente estudio, los resultados obtenidos y posibles propuestas de mejora; la extrapolación de los resultados a áreas dominadas por otras especies arbóreas, del mismo o de diferente género; la importancia que adquieren los mapas de modelos de combustibles para la gestión y ordenación del territorio; y posibles líneas futuras al respecto.

5.1. Valoración del proceso metodológico y de los resultados obtenidos

La base de datos ha constituido una de las herramientas fundamentales para el presente estudio ya que ha permitido no sólo almacenar los datos recopilados en campo sino establecer múltiples análisis de las variables y relacionarlas entre ellas. Su diseño de tipo relacional ha facilitado la estructuración de los datos, adaptándose a las necesidades del proyecto y evitando fallos y errores en los subsiguientes procesos analíticos. En este sentido, la disposición de datos forestales organizados y adaptados a las necesidades del trabajo ha sido un factor esencial para la consecución de resultados significativos.

Por su parte, las variables de los estratos de la FCC recogidas en campo han demostrado ser las que mejor explican los modelos de combustible *Prometheus*, tal y como reflejan los *boxplots* de la figura 4.1. En ellos se comprueba la estrecha relación existente entre los diferentes tipos de modelos de combustible y los tramos de altura de la FCC de la vegetación. En los modelos de propagación en matorrales y arbustos, el diagrama nos muestra que para el tipo 2 hay una importante presencia de la FCC del estrato 2 (subarborescente, menor de 1 m) y un progresivo descenso de la FCC hacia estratos mayores. El de tipo 3 se comporta de una manera similar al anterior pero con menor FCC en el estrato subarborescente y mayor en el estrato 3 (arborescente, entre 1 y 3 m). Por su parte, en el tipo 4 hay una importante FCC en los estratos 2 y 3 pero destaca entre ellos el estrato 4 (arborescente, entre 3 y 5 m), lo que enlaza perfectamente con el concepto de este tipo de modelo, en el que ha de existir una continuidad en altura desde los estratos inferiores a los superiores, sin presencia elevada de estratos arbóreos. Por su parte, en los modelos de propagación en árboles destacan los de tipo 6 y 7, en especial este último, que guarda relación con el de tipo 4 con la diferencia de que, en este caso, la FCC de los estratos arbóreos es predominante. Por otro lado, de la totalidad de las variables LiDAR utilizadas en las pruebas de los modelos predictivos, la mejor explicativa fue la desviación típica de las elevaciones de los retornos, al confirmarse mediante los *boxplots* de la figura 4.3 la correlación entre los retornos por las diferentes alturas establecidas y el modelo de combustible. Estos tramos, además, están establecidos en función de las alturas de los principales mecanismos de propagación del fuego propuestos por el modelo *Prometheus* y adaptadas al desfase temporal entre LiDAR y campo, lo que permite una mayor aproximación de la altura real de las masas de *Pinus halepensis*.

El modelo utilizado en el estudio a partir del análisis predictivo explica un 68% de los casos. Se trata de un valor importante pero no elevado, por lo que se plantea la necesidad de establecer mejoras combinando otras variables no utilizadas en el presente estudio o realizando un tratamiento de mayor énfasis en los datos LiDAR, lo cual no ha sido posible por las limitaciones que supone un trabajo fin de grado. A lo largo del tratamiento de los datos LiDAR, se han generado una serie de contratiempos relacionados con la complejidad del manejo de esta información, lo que ha evidenciado que esta fase supone uno de los ejes más importantes y que mayores consecuencias tiene en los resultados finales dependiendo de los métodos empleados. La existencia de errores en determinadas categorías, que ha propiciado la eliminación de algunas de ellas, puede suponer una reducción en la significación de los resultados tanto si no se tienen en cuenta estos fallos como si se detectan pero se realizan procesos de reajuste equivocados. Por otro lado, la enorme cantidad de información disponible en los datos LiDAR pone de manifiesto la necesidad de un análisis riguroso y detallado de los mismos para obtener los mejores resultados posibles, que exigen una dedicación en tiempo muy elevada. En el contexto de este trabajo, los análisis realizados a las métricas básicas (mínimo, máximo, mediana, media, desviación estándar) de las variables LiDAR más significativas, y que se relacionaban con los datos de campo, ha ayudado en gran medida a establecer cuáles eran las que mejor se adaptaban a los modelos de combustible.

Respecto a las representaciones cartográficas de los modelos de combustible para los tres incendios, los resultados exponen una clara dominancia del modelo de tipo 4 (arbustivo continuo) seguido del tipo 7 (arbóreo con sotobosque alto), que se relaciona con el propio carácter de las masas boscosas de *Pinus halepensis*. Esta especie suele poseer un abundante sotobosque y numerosa materia vegetal muerta o necromasa que se acumula en los estratos inferiores por la ausencia de poda natural. Además, el ritmo de crecimiento natural del *Pinus halepensis* es relativamente rápido en comparación con otras especies, siendo además monoespecífica y creciendo los pies regenerados muy próximos entre sí. Este último hecho es fundamental para explicar la dominancia del tipo 4, situadas en las áreas de los incendios de 1994, mientras que masas más longevas y de mayor altura con sotobosque explican el dominio del tipo 7, que se situaban en zonas inmediatas a las anteriores no afectadas por los incendios. Estos factores permiten, asimismo, explicar la elevada combustibilidad de esta especie y que los incendios sean tan graves para el territorio ya que, al existir continuidad entre los individuos (por regenerados y/o sotobosque), el fuego se propaga de manera mucho más extensa por el espacio forestal. Como contrapunto, destaca la escasa presencia de modelos de combustible de tipo 5, atendiendo a razones que se relacionan con los del punto anterior. Este modelo se caracteriza por la propagación a través de las copas de los árboles al no existir otros estratos inferiores sino matorrales y hierba. Ello constituye un hecho muy poco común en los bosques de *Pinus halepensis*, debido a las características que acaban de ser detalladas, por lo que es totalmente lógico que este tipo de combustible sea el menor representado en los tres incendios, y en cambio, los modelos 4 y 7 sean los de mayor presencia.

Las dificultades encontradas a lo largo del proceso de elaboración del trabajo plantean la propuesta de algunos métodos que sirvan para mejorar los resultados finales y, con ello, las cartografías resultantes. Estas mejoras se concentrarían, sobre todo, en la parte de los datos LiDAR. Uno de los principales problemas que conlleva el tratamiento de esta información es la presencia de puntos que son realmente suelo pero que están clasificados en categorías de no-suelo. Los puntos LiDAR del PNOA poseen errores altimétricos medios de 0,2 m, por lo que puede darse el caso de que haya retornos mal clasificados, pudiendo producirse errores en los análisis posteriores al confundirse estos retornos con estratos de matorral o subarbustivos, cuando en realidad representan la superficie del terreno. En el presente trabajo se ha seguido la metodología aconsejada por Montealegre *et al.* (2015) para la clasificación de los puntos como suelo y no-suelo, pero ello no impide que pueda darse el caso de este tipo de situaciones debido a los errores por defecto de la información LiDAR. Como se ha comentado, es necesario una dedicación muy importante tanto de recursos humanos como de tiempo para solventar este y otros problemas derivados de la elevada cantidad de información LiDAR con la que se ha de trabajar. Otra problemática encontrada en los LiDAR es la frecuencia de la cobertura de los datos. Se ha trabajado con información de 2009 (para Requena) y 2010 (para Uncastillo y Villarluengo), mientras que los datos de campo se recopilaban en 2017. Esto produce un desfase de 7-8 años que puede generar errores a la hora de introducir las variables LiDAR en los algoritmos de decisión puesto que, de no haberse producido ningún incendio o actuación humana, la biomasa vegetal habrá aumentado durante el periodo de tiempo que separa ambas informaciones. En nuestro caso, hubo que estimar los tramos de las alturas LiDAR en función del crecimiento vegetal de *Pinus halepensis* para adecuarlos al estado actual.

5.2. Extrapolación del modelo a otras especies

Una de las cuestiones que plantean estos resultados es su extrapolación hacia otras masas arbóreas. El presente estudio se ha centrado en masas de *Pinus halepensis*, recogiendo variables asociadas a esta especie y, por consiguiente, generando los mapas de modelos de combustible aplicables sólo a áreas dominadas por ella. Por este motivo, en las cartografías, los sectores de los incendios donde no hay presencia importante del *Pinus halepensis* son mostrados con mayor transparencia, ya que no se pueden extrapolar a priori los resultados por las diferentes características de otras masas vegetales y de su comportamiento contra el fuego. En los tres incendios forestales estudiados, encontramos masas dominadas por *Pinus halepensis* que se combinan con otras zonas donde domina *Pinus pinaster* y diversos géneros de quercíneas. Al igual que el pino carrasco, *Pinus pinaster* produce una gran cantidad de semillas que son dispersadas por el territorio y, una vez éste ha sido incendiado, germinando las nuevas especies con independencia de las altas temperaturas existentes (Reyes y Casal, 2000), haciéndolo de manera monoespecífica. En estas áreas, la extrapolación de los modelos de combustible obtenidos podrían llegar a ser ajustadas a la realidad; no obstante, para unos resultados más fiables y empíricos haría falta trabajar con variables específicas para *Pinus pinaster*. Mayores problemas lo plantean las quercíneas, las cuales sí presentan comportamientos más diferenciados que el pino carrasco. No son tan prolíficas en la producción de semillas y la colonización del territorio tras un incendio se realiza a través de su rebrotado mediante las raíces del subsuelo. Ello propicia un regenerado menos denso que en el caso del *Pinus halepensis*, por lo que, en zonas donde la regeneración sea importante para ambos géneros, los modelos de combustible serán diferentes.

Además de las diferencias espaciales entre especies hay que considerar también las temporales. Uno de los posibles problemas es la posibilidad de que antes del incendio no hubiera la misma masa vegetal dominante que la existente en la actualidad por diversos factores como las alteraciones edáficas que se producen en los incendios que favorecen los cambios en la materia orgánica, la erosión o el tipo de suelo. El cambio de vegetación en un área puede afectar a la frecuencia e intensidad de los incendios forestales ya que no todas las especies poseen el mismo grado de inflamabilidad ni la misma adaptabilidad al fuego. Constituye, por tanto, un factor importante a considerar en la realización de estudios sobre combustibles forestales en áreas incendiadas. En nuestro caso, el estudio se ha centrado en *Pinus halepensis*, por lo que los cambios temporales en el dominio de la masa vegetal es menos plausible, debido a la dispersión de las semillas por las altas temperaturas que favorece la colonización y el regenerado post-fuego de la misma especie en el área incendiada.

5.3. Utilidad de los mapas de combustibles para la gestión del territorio

El conocimiento del territorio es fundamental para una gestión adecuada del mismo. En este sentido, conocer la distribución espacial de los modelos de combustible a través de su representación cartográfica supone una gran ventaja puesto que permite estimar el comportamiento del peligro en una determinada zona. Además, la gestión de los combustibles forestales es sumamente importante puesto que es el único factor que incide sobre el comportamiento del fuego sobre el que es posible actuar (Novo y Marey, 2001). Por ello, los mapas de modelos de combustible representan un valioso método de prevención y de protección, tanto del medio natural como de las poblaciones humanas, ayudando a realizar planificaciones territoriales más convenientes de acuerdo al peligro existente y permitiendo gestionar el bosque de una manera más óptima.

El combustible forestal es uno de los tres elementos que propician la aparición del fuego junto con el oxígeno, de componente puramente natural, y la fuente de calor, producida a partir de la doble vía natural y antrópica. Ello hace necesario comprender el espacio geográfico a una escala más de detalle para detectar cuáles son los factores que intensifican este peligro natural en un determinado espacio y, con ello, plantear medidas de prevención y protección más eficaces a través de estrategias que tengan como fin la atenuación o minimización del peligro y del riesgo para la población. En este escenario entrarían en juego los mapas de los combustibles forestales, por su capacidad descriptiva del peligro del fuego y su distribución en el territorio. Con su conocimiento se pueden establecer medidas de mitigación estructurales, como por ejemplo la conversión de modelos de combustible 4 y 7 a tipos 2 y 5, respectivamente, mediante desbroces, pastoreo, eliminación o mejora del matorral o limpieza de necromasa de forma periódica en el tiempo.

No obstante, es conveniente que estas herramientas se apoyen con el resto de componentes del territorio que forman parte de la propagación de fuego. Se ha incidido en medidas de prevención orientadas hacia la vegetación, pero no hay que olvidar tampoco la componente climática. En este sentido, los mapas elaborados de los combustibles forestales se pueden complementar con otros documentos cartográficos que expongan el régimen dominante de los vientos, así como su frecuencia e intensidad, en un área forestal determinada, o el grado de insolación existente. De esta manera, se integran variables que originan los incendios y definen la forma de propagación del fuego, lo que, unido al modelo de combustible existente, permite la ejecución de medidas preventivas eficaces. Otras variables a combinar con los mapas de combustibles forestales pueden ser abordadas desde la teledetección pasiva, como el conocimiento del grado de humedad existente en una masa vegetal a partir de la absorción y reflexión en determinadas bandas del espectro electromagnético. Ello permite estimar la disponibilidad de agua que hay en una planta o, en otras palabras, el grado de sequedad que presentan, resultando una información de gran interés si se combina, sobre todo, con los mapas de combustibles forestales.

La disponibilidad de capital físico y humano en un determinado territorio define en gran medida la gestión de los bosques y, por consiguiente, la probabilidad de que los incendios forestales sean más o menos frecuentes e intensos. Conviene destacar que la distribución de *Pinus halepensis* por el territorio peninsular (figura 2.2) abarca una gran parte de zonas de muy baja densidad demográfica, como la Serranía Ibérica, el Maestrazgo, la Alcarria o la Mancha. Este hecho favorece la acumulación de combustible forestal por la ausencia de medios técnicos y humanos para la gestión del bosque, unido a la ausencia de poda natural de *Pinus halepensis*, propiciando un aumento de la peligrosidad. Si bien la exposición de los bienes y las personas es menor, al tratarse de zonas despobladas, la vulnerabilidad es más alta, no sólo por la falta de servicios sino por el envejecimiento de la población de los espacios rurales, típico de las sociedades desarrolladas en la actualidad. En este contexto, los mapas de combustibles forestales elaborados en nuestra zona de estudio (espacios rurales) pueden servir también como documentos de difusión entre la población con el fin de dar a conocer el riesgo al que están sometidos y, de cara a las autoridades competentes, para planificar el territorio y establecer zonificaciones adecuadas de los usos del suelo. En este trabajo, se han reflejado en las cartografías los núcleos de población existentes en la zona para exponer el riesgo al que está sometida la población, sirviendo como medida de prevención al igual que lo constituyen otros documentos cartográficos de riesgos como los de las inundaciones fluviales.

5.4. Identificación de líneas futuras de trabajo

El estudio realizado puede servir para líneas de trabajo futuras relacionadas con la estimación de modelos de combustible y otros aspectos como la regeneración post-fuego, la biomasa y estructura vegetal existente o el papel del medio natural y humano en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales. En este sentido, el proyecto SERGISAT, donde se inscribe el presente estudio, abre la posibilidad a que se obtengan resultados de mayor consistencia mediante la recogida de las mismas variables empleadas u otras que se consideren oportunas ampliando la muestra hacia un mayor número de incendios forestales del año 1994, pudiéndose apoyar en los datos que se han obtenido en el presente estudio o en la metodología aplicada. La existencia de una base de datos elaborada para este estudio donde se recogen, además, otras variables como las especies existentes por parcela y su dominancia por estrato, la densidad de los árboles regenerados o variables geomorfológicas y edáficas permite, en este sentido, al proyecto SERGISAT una mayor flexibilidad en el uso de los datos. También existe la posibilidad de utilizar, como ya se ha comentado, otras herramientas de las tecnologías de la información geográfica, como la teledetección pasiva para recoger determinadas variables de las parcelas a partir del espectro electromagnético como la severidad del incendio, la cobertura vegetal o el grado de humedad existente en una masa forestal, entre otros. En síntesis, este trabajo, si bien presenta resultados que pueden ser considerados como concluyentes, pretende dejar la puerta abierta a la posibilidad de mejoras futuras en la estimación los modelos de combustible, así como su uso combinado con otras variables del espacio geográfico y generar información relevante para la gestión del territorio.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha modelado la disponibilidad de combustible forestal a partir de trabajo de campo, realizado en 73 parcelas de *Pinus halepensis*, del que se ha utilizado la estimación de la cubierta vegetal por estratos (FCC) y la determinación *in situ* del modelo de combustible *Prometheus*, y de datos del primer vuelo LiDAR PNOA, de baja densidad de puntos. Dado que los 7 modelos de combustible definidos en este sistema de clasificación son de naturaleza categórica y las variables independientes utilizadas para el modelado no cumplen el supuesto de normalidad, se han ensayado análisis estadísticos no paramétricos; *Support Vector Machine* (SVM) se ha revelado el mejor método de estimación.

Los resultados, que son muy satisfactorios, ofrecen un grado de significación relativamente importante. Con la introducción en el modelo geoestadístico de la FCC de campo y de la desviación estándar de la altura de los retornos LiDAR, se ha obtenido un coeficiente *Accuracy* del 68% de explicación de los casos. Ello ha permitido espacializar el modelo utilizando únicamente métricas LiDAR (porcentaje de retornos por estratos definidos y desviación estándar de la nube de puntos total) con un importante grado de exactitud, sirviendo de base para estudios y trabajos posteriores de prevención y protección ante los incendios forestales.

El trabajo realizado ha permitido verificar la capacidad, inicialmente planteada, del uso conjunto de datos LiDAR y de campo, así como de su gestión estructurada en bases de datos relacionales y entorno SIG, para obtener resultados estadísticamente relevantes. No obstante, como es lógico, han surgido ciertos problemas y limitaciones que son susceptibles de mejora en futuros trabajos; por ejemplo, la selección de las variables puede ser mejor

definida con una dedicación de tiempo mayor o, también, los datos LiDAR, no exentos de errores puntuales, pueden ser objeto de depuración. Con todo, es de destacar la validez de los datos del vuelo PNOA, a pesar de su baja densidad de puntos, lo que pone en valor esta información sistemáticamente registrada y disponible para todo el territorio nacional y que, además, va a ser objeto de actualización periódica.

Al trabajar únicamente con datos de campo de *Pinus halepensis*, en principio, se presupondría que el modelo y su plasmación cartográfica no deberían ser extrapolados a otras especies que puedan conformar la masa forestal. No obstante, la calidad de los resultados y la evidencia de que es posible, mediante las métricas LiDAR seleccionadas, caracterizar la estructura vertical de la vegetación, característica independiente en gran medida de la especie analizada, permiten aplicar el modelo generado a toda el área de estudio, con independencia de la especie dominante; en todo caso, se ha considerado necesario diferenciar en los mapas qué superficies son dominadas por pino carrasco y cuáles lo son por otras especies. La aplicación a otras formaciones forestales de la metodología aquí propuesta, que ya se ha comenzado a probar en el marco del proyecto SERGISAT, permitirá evaluar la semejanza o las diferencias de modelos entre especies. De este modo, el presente estudio es de utilidad para líneas de trabajo futuras.

El uso de la cartografía de combustibles forestales junto con otros documentos técnicos-científicos constituye una herramienta de gran importancia para evaluar la intensidad y magnitud del riesgo de incendios forestales. Además, tal cartografía es fundamental para guiar la intervención que en materia de gestión ambiental y territorial deben llevar a cabo las administraciones competentes, especialmente en paisajes mediterráneos en los que el papel del fuego forestal está adquiriendo mayor protagonismo, tanto en términos ambientales como paisajísticos y socioeconómicos.

7. Bibliografía

- Aguilera, M.J.; Borderías, M.P.; González, M.P.; Santos, J.M. (2009): *Geografía General I. Geografía Física*. Colección Grado. Editorial Uned. Madrid.
- Albini, F.A. (1976): *Estimating wildfire behavior and effects*. General Technical Report INT-30. Intermountain Forest And Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, Utah.
- Alía, R.; García, J.M.; Iglesias, S.; Mancha, J.A.; De Miguel, J.; Nicolás, J.L.; Pérez, F.; Sánchez, D. (2009): *Regiones de procedencia de especies forestales en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- Arroyo, L.A.; Healey, S.P.; Cohen, W.B.; Cocero, D.; Manzanera, J.A. (2006): Using an object-oriented classification and high-resolution imagery to map fuel types in a Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research*, 111, G04S04, doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2005.JG000120>
- Biro, Y. (2009): *Convivir con los incendios forestales: lo que nos revela la ciencia. Una aportación al diálogo político-científico*. European Forest Institute (EFIMED). Mediterranean Regional Office. Joensuu, Finland.
- Bodí, M.B.; Cerdà, A.; Mataix-Solera, J.; Doerr, S.H. (2012): Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 58, pp. 33-55.
- Cabanillas, A.M. (2010): *Bases para la gestión de masas naturales de Pinus halepensis Mill. en el valle del Ebro*. Serie Investigación. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Zaragoza.
- Conesa, A. (2005): *Tormentas severas en la Ibérica de Teruel y sus efectos sobre la masa forestal*. AEMET. Centro Meteorológico Territorial en Aragón, La Rioja y Navarra.
- Cuadrat, J.M.; Saz, M.A.; Vicente, S.M. (2009): *Atlas Climático de Aragón*. Servicio de Información y Educación Ambiental. Dirección General de Calidad Ambiental y Cambio Climático. Departamento de Medio Ambiente. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Chuvieco, E. (2008): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel Ciencias. Editorial Ariel. Barcelona.
- Chuvieco, E.; Martín, M.P. (2004): *Nuevas tecnologías para la estimación de riesgo de incendios forestales*. Colección de Estudios Ambientales y Socioeconómicos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Economía y Geografía. Madrid.
- de la Riva, J. (1997): *Los montes de la Jacetania. Caracterización física y explotación forestal*. Serie Investigación. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Zaragoza.
- Domingo, D. (2015): *Estimación de variables dasométricas en masas de Pinus halepensis Mill. mediante datos LiDAR y trabajo de campo*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Zaragoza.
- Escolano, S. (2015): *Sistemas de Información Geográfica: una introducción para estudiantes de Geografía*. Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Fernández Alonso, O. (2016): *Estimación de los modelos de combustible basada en datos de sensores remotos*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo.
- Font, I. (2007): *Climatología de España y Portugal*. Ediciones Universidad de Salamanca.
- Franco, T. (2007): *Geografía de España (Física, Humana y Económica)*. Proyectos Córdon. Madrid.

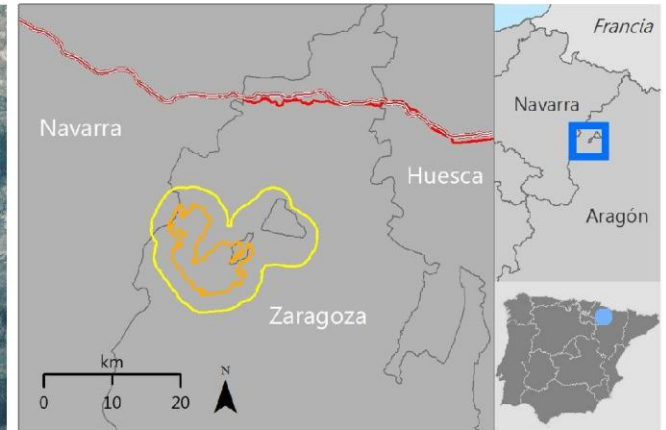
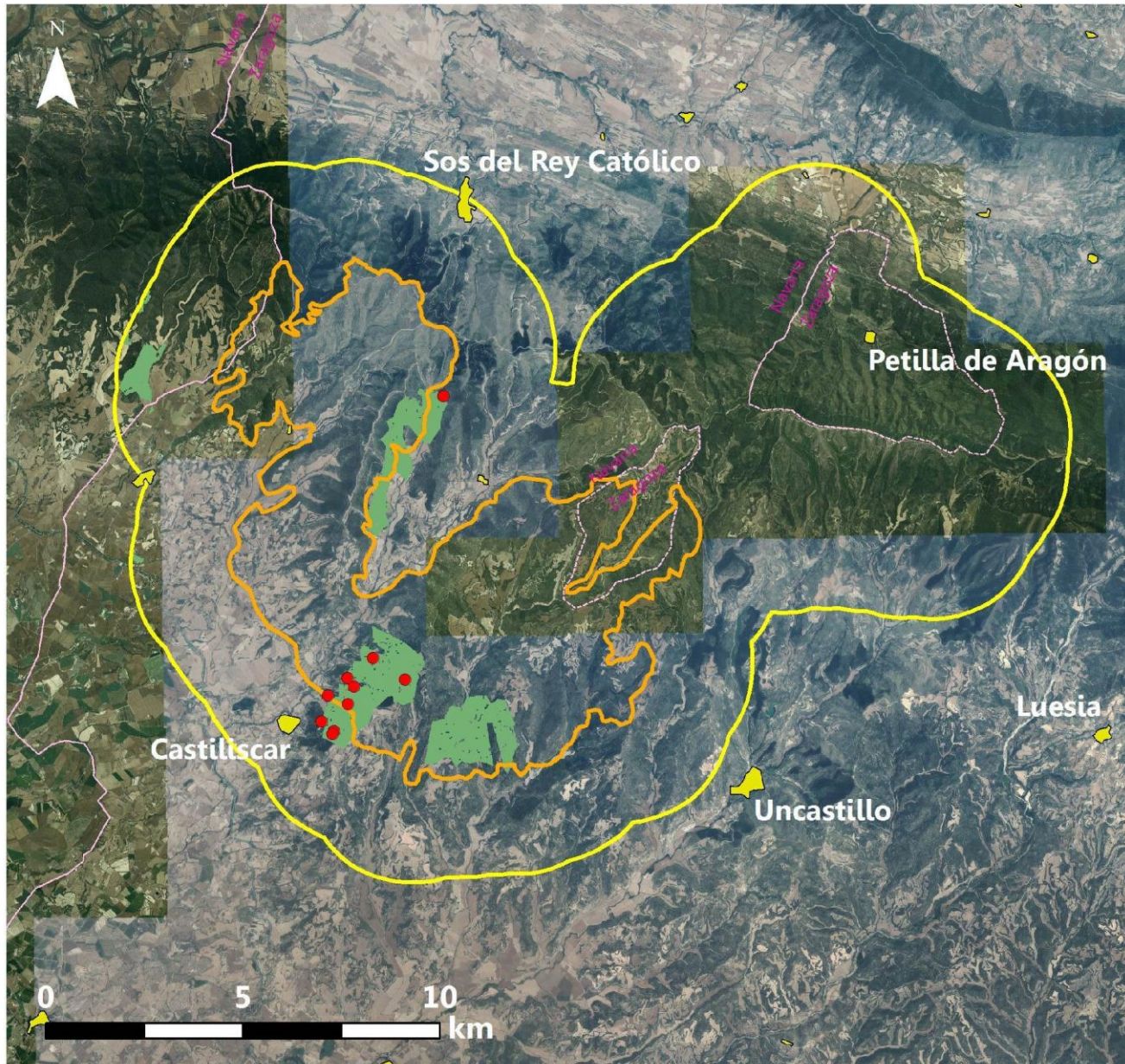
- Gobierno del Principado de Asturias (2007): *Prevenir los incendios forestales*. Colección: El Monte Asturiano. Consejería de Medio Rural y Pesca. Servicio de Montes y Producción Forestal. Oviedo.
- Herranz, J.M. (2000): Aspectos botánicos y ecológicos del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 10, pp. 13-17.
- Ibáñez, E.J. (coord.) (2007): *Comarca del Maestrazgo*. Colección Territorio. Departamento de Política Territorial, Justicia e Interior. Gobierno de Aragón.
- Ibarra, P. (2007): Marco geográfico y rasgos geomorfológicos de la comarca de las Cinco Villas. En Asín, N. (coord.), *Comarca de Cinco Villas*. Colección Territorio. Departamento de Política Territorial, Justicia e Interior. Gobierno de Aragón.
- López Santalla, A.; Jemes Díaz, V.; Rodero Merino, C. (2017): Evolución histórica y reciente de los grandes incendios forestales en España. Perspectivas de futuro. En *VII Congreso Forestal Español*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Plasencia, Cáceres.
- Marañón, T. (1999). El bosque mediterráneo. En Jurado, V. (coord.), *Naturaleza en Andalucía*, vol. 7, pp. 16-50. <http://hdl.handle.net/10261/57861>
- Marino, E.; Ranz 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*, 65, pp. 34-42.
- Martínez Vega, J.; Martín Isabel, M.P. (2010): *Guía didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Red Natural de Teledetección Ambiental. Centro de Ciencias Humanas y Sociales. CSIC. Madrid.
- McGaughey, R.J. (2018): *FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization*. U.S. Department Of Agriculture. Forest Service. Pacific Northwest Research Station. University of Washington.
- Ministerio de Medio Ambiente (2002): *Los incendios forestales en España. Decenio 1991-2000*. Área de Defensa contra Incendios Forestales. Secretaría General de Medio Ambiente.
- Montealegre, A.L.; Lamelas, M.T.; de la Riva, J. (2015): Comparison of open source LiDAR filtering algorithms in a Mediterranean forest environment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8, pp. 4072-4085.
- Morfin-Ríos, J.E.; Jardel, E.J.; Alvarado, E.; Michel-Fuentes, J.M. (2012): *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*. Comisión Nacional Forestal. Universidad de Guadalajara. Jalisco, México.
- Novo, M.; Marey, M.F. (2001): Gestión del combustible vegetal para la prevención contra incendios forestales. En *III Congreso Nacional de Teledetección*. Granada.
- Ojeda, J.C. (2016): *PNOA-LiDAR. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*. Subdirección General de Geodesia y Cartografía. Unidad de Observación de Territorio. Instituto Geográfico Nacional.
- Olaya, V. (2014): *Sistemas de Información Geográfica*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Pausas, J.G.; Vallejo, R. (2008): Bases ecológicas para convivir con los incendios forestales en la Región Mediterránea: decálogo. *Ecosistemas, Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 17 (2), pp 128-129.
- Pérez-Planells, Ll.; Delegido, J.; Rivera-Caicedo, J.P.; Verrelst, J. (2015): Análisis de métodos de validación cruzada para la obtención robusta de parámetros biofísicos. *Revista de Teledetección*, 45, pp. 55-65. Asociación Española de Teledetección. doi: <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2014.4153>
- Plana, E.; Barrigón, L. (2007): *Manual para la comprensión y tratamiento informativo del fenómeno de los incendios forestales*. FSE, Fundación Biodiversidad. CTFC. Barcelona.

- Plana, E.; Font, M.; Serra, M. (2016). *Los incendios forestales, guía para comunicadores y periodistas*. Proyecto eFIRECOM. Ediciones CTFC. Barcelona.
- Puértolas, J.; Prada, M.A.; Climent, J.; Oliet, J.; Del Campo, A.D. (2012): *Pinus halepensis* Mill. En *Producción y Manejo de Semillas y Plantas Forestales*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, pp. 855-880.
- Ramírez Cisneros, J.; Blanco Martínez, J.; Cerrillo Cuenca, A.; Marqués Rodríguez, G.; Valcarce Diñeiro, R.; Llordén Pozo, J.M. (2013): 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. En *VI Congreso Forestal Español*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Vitoria-Gasteiz.
- Reyes, O.; Casal, M. (2000): Comportamiento reproductivo tras fuego de especies forestales en Galicia. *Cuadernos de la S.E.C.F.*, 9, pp.-109-114.
- Rosales, J.J.; Rodrigo, J.J. (2012): Tecnología LiDAR aplicada a la gestión del territorio. *Tierra y Tecnología*, 41, pp. 57-59.
- Rothermel, R.C. (1972): *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Research paper INT-115. Intermountain Forest And Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, Utah.
- Sánchez, M.A.; Fernández, A.A.; Illera, P. (1999): Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión forestal. En *Teledetección: Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección*, pp. 96-99. Albacete.
- Vélez, R. (1993): *Manual de formación para la lucha contra incendios*. ICONA.

Anexos

A continuación se presentan las cartografías de las tres áreas de estudio con sus respectivos mapas de modelos de combustible

INCENDIO DE UNCASTILLO



LEYENDA

1. Incendio

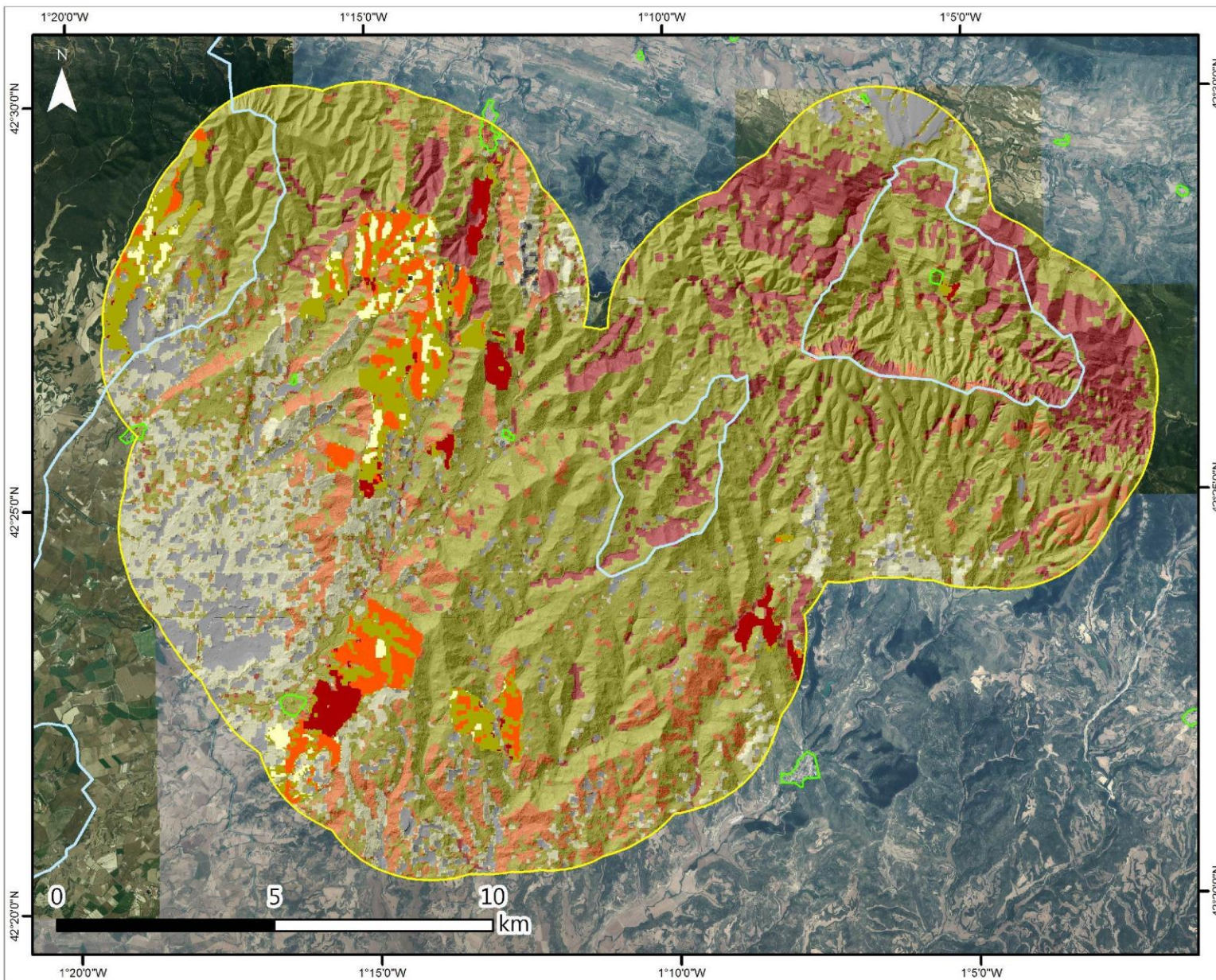
- Área incendiada en 1994
- Área ampliada (control)
- Zona Pinus halepensis
- Parcelas experimentales

2. Otros elementos

- Autopistas y autovías
- Carreteras nacionales
- Núcleos de población
- Límite provincial

Proyección cartográfica: ETRS 1989 UTM 30N. Dátum: WGS84.
Fuentes: PNOA, IGN. Elaborado por: Raúl Hoffrén Mansoa.
Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. Junio de 2018.

MODELOS DE COMBUSTIBLE PARA MASAS DE PINUS HALEPENSIS MILL. INCENDIO DE UNCASTILLO (ZARAGOZA)



Modelos de combustible (Prometheus)

Propagación en arbustos:	Propagación en árboles:
2	5
3	6
4	7

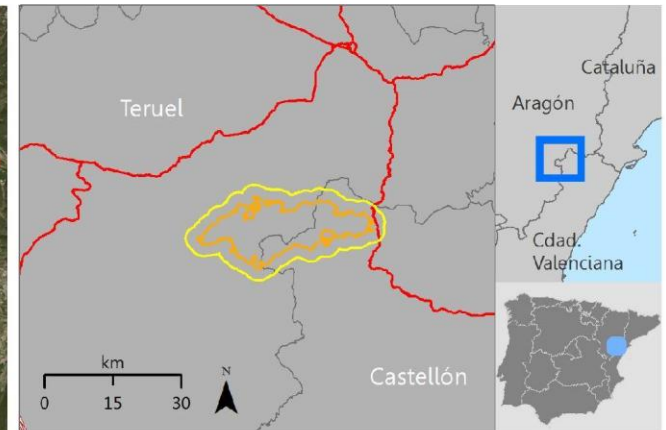
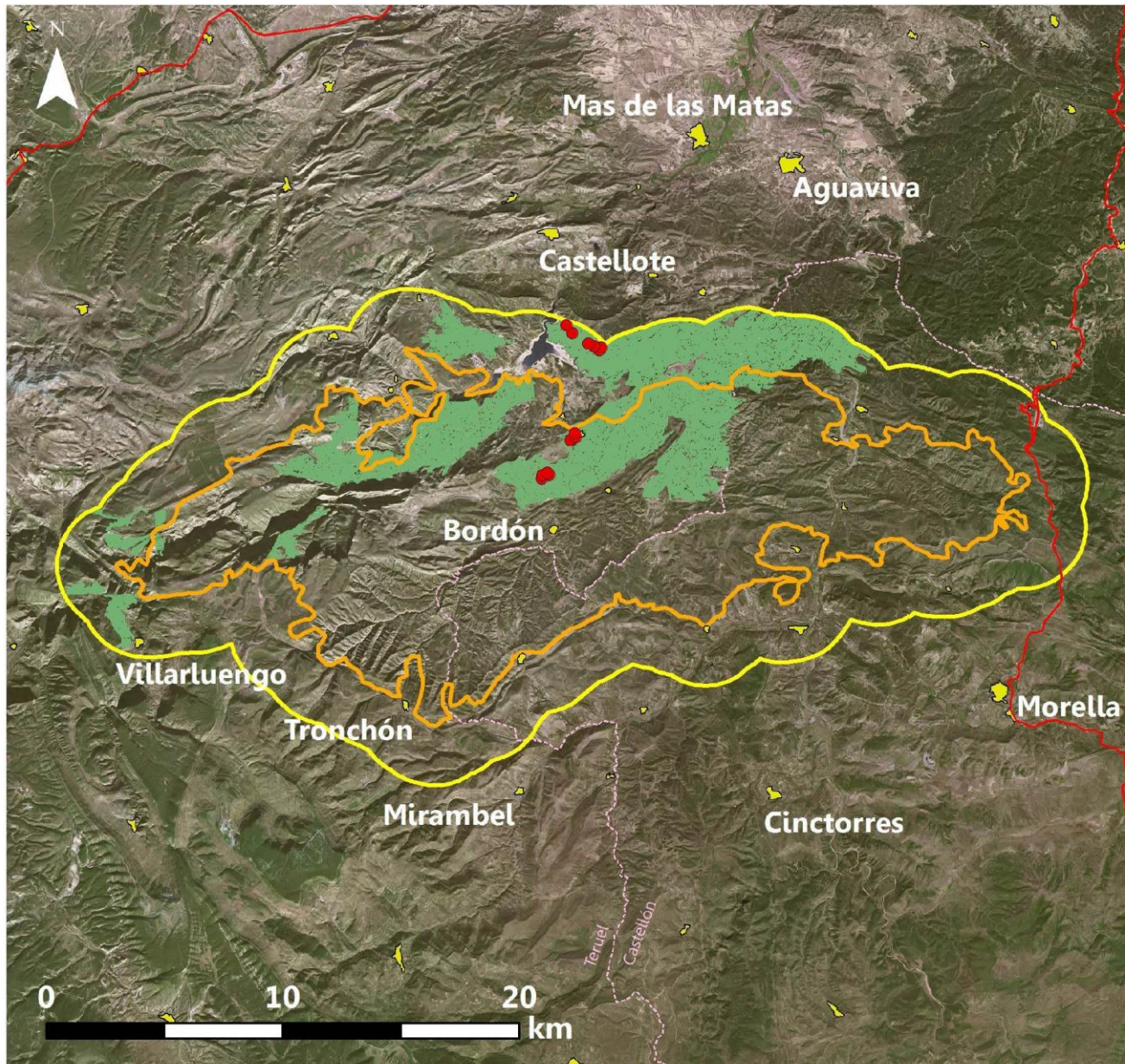
Zonas sin propagación:
Sin combustible

Otros elementos:

- Límite del área de estudio
- Núcleos de población
- Límite provincial

Proyección cartográfica: ETRS 1989 UTM Zona 30N.
Dátum: WGS 84. Fuentes: PNOA, IGN. Elaborado por:
Raúl Hoffrén Mansoa. Dpto de Geografía y Ordenación
del Territorio. Universidad de Zaragoza. Junio 2018.

INCENDIO DE VILLARLUENGO



LEYENDA

1. Incendio

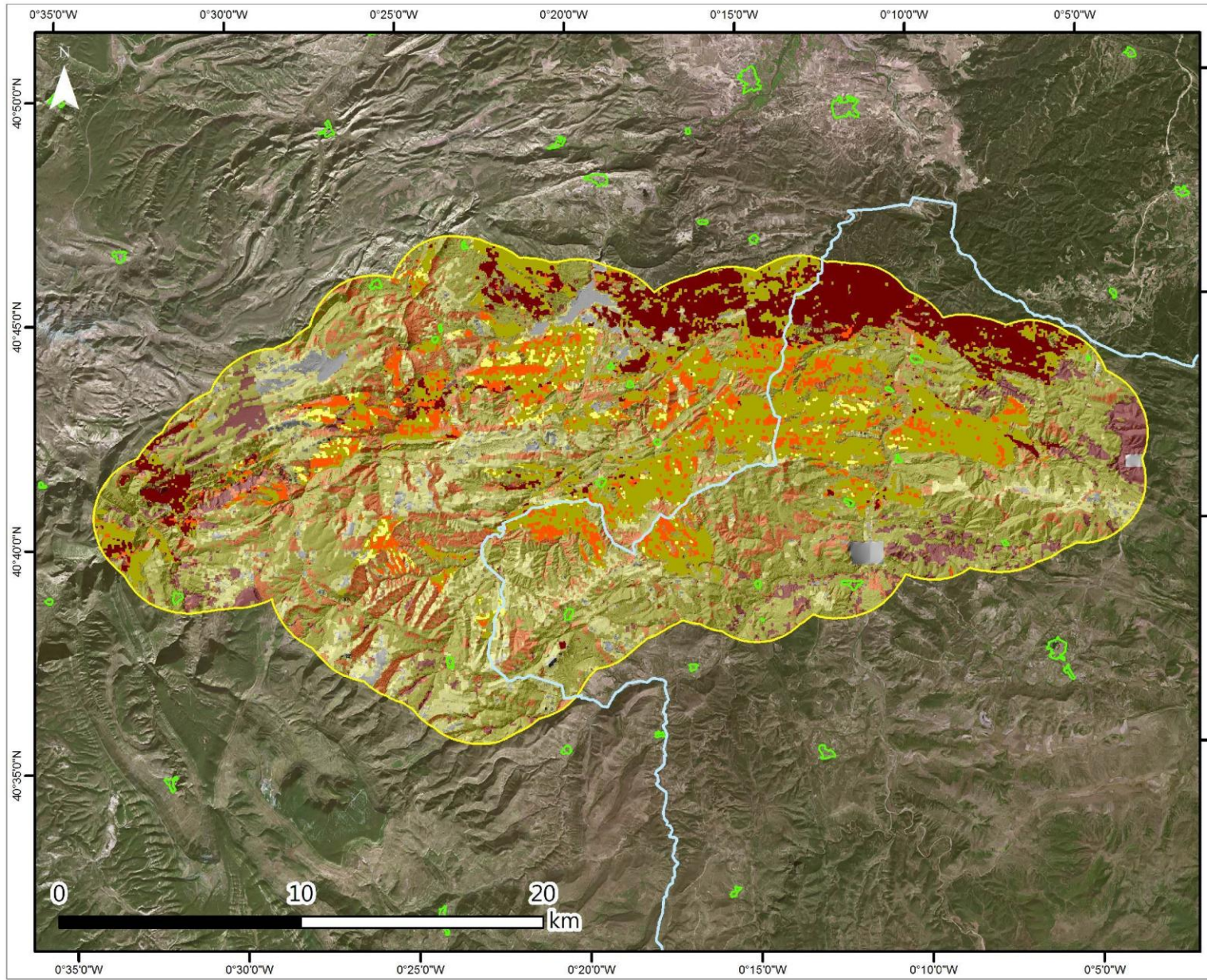
- Área incendiada en 1994
- Área ampliada (control)
- Zona Pinus halepensis
- Parcelas experimentales

2. Otros elementos

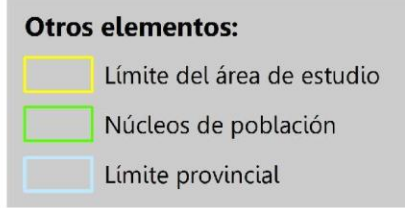
- Carreteras nacionales
- Núcleos de población
- Límite provincial

Proyección cartográfica: ETRS 1989 UTM 30N. Dátum: WGS84.
Fuentes: PNOA, IGN. Elaborado por: Raúl Hoffrén Mansoa.
Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. Junio de 2018.

MODELOS DE COMBUSTIBLE PARA MASAS DE PINUS HALEPENSIS MILL. INCENDIO DE VILLARLUENGO (TERUEL)

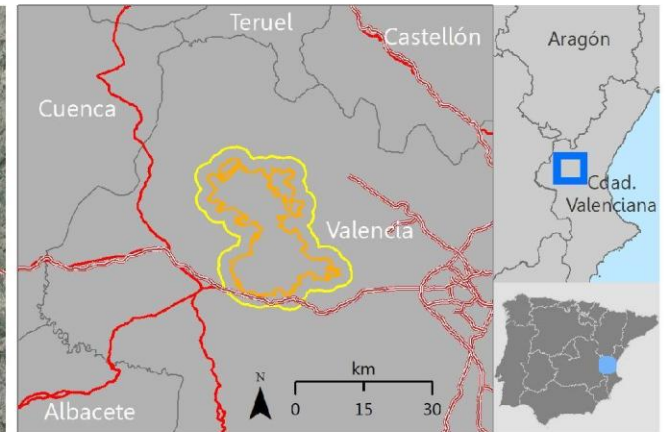
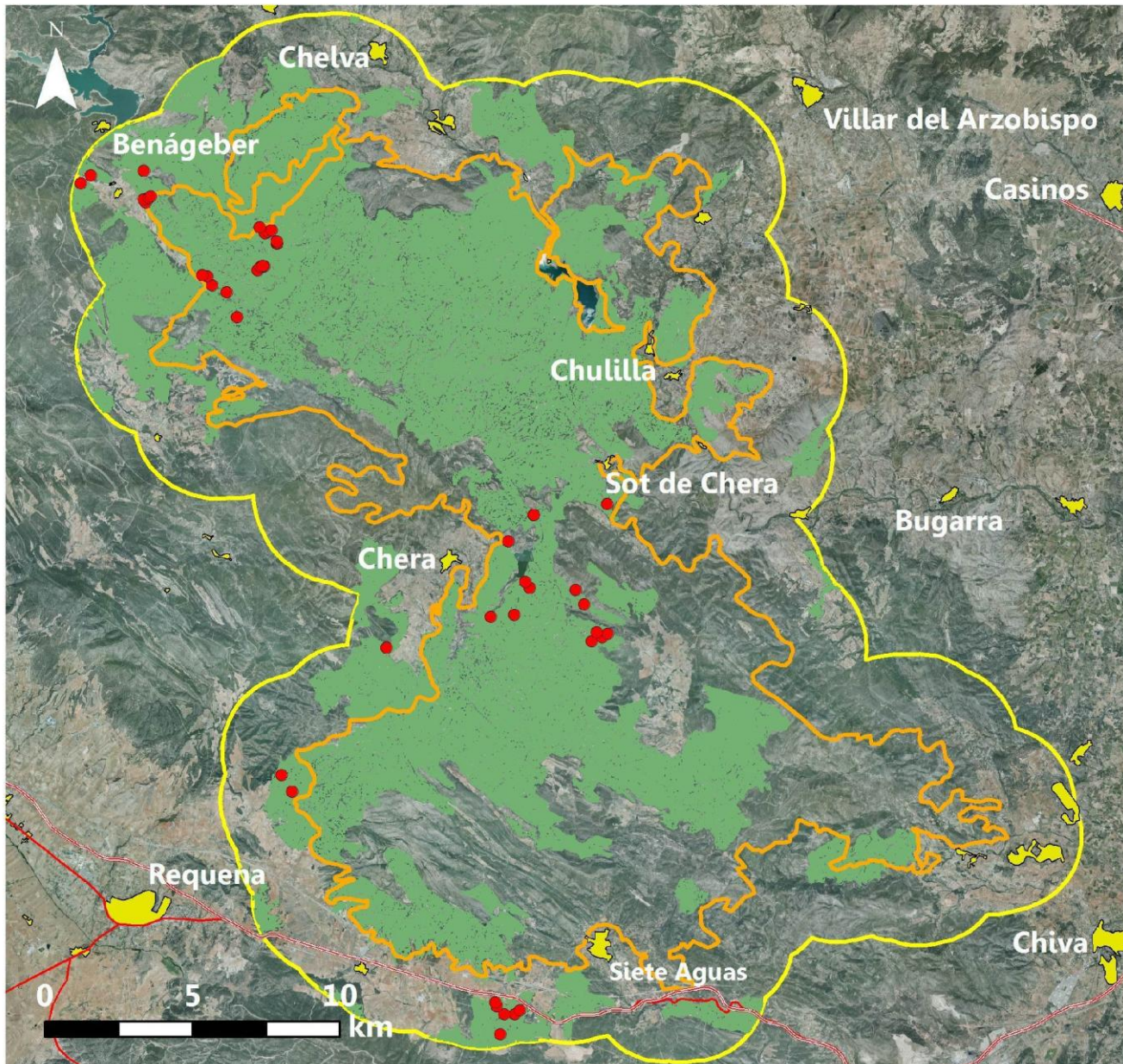


Modelos de combustible (Prometheus)



Proyección cartográfica: ETRS 1989 UTM Zona 30N.
 Dátum: WGS 84. Fuentes: PNOA, IGN. Elaborado por:
 Raúl Hoffrén Mansoa. Dpto de Geografía y Ordenación
 del Territorio. Universidad de Zaragoza. Junio 2018.

INCENDIO DE REQUENA



LEYENDA

1. Incendio

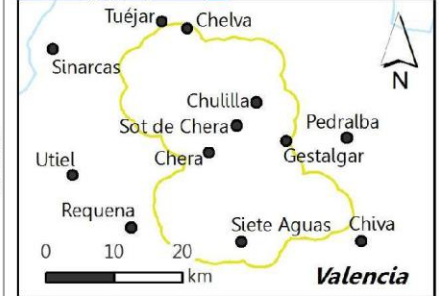
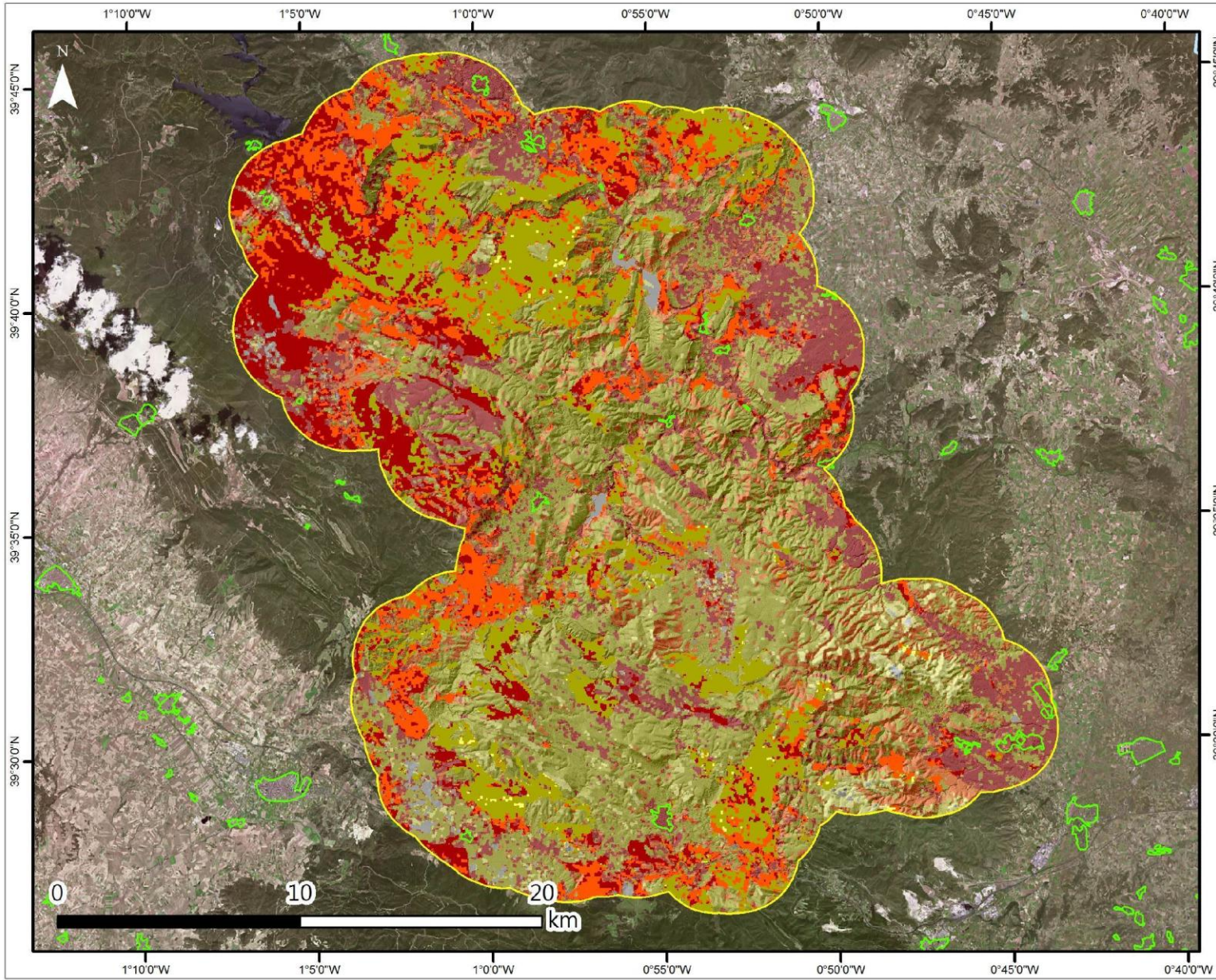
- Área incendiada en 1994
- Área ampliada (control)
- Zona Pinus halepensis
- Parcelas experimentales

2. Otros elementos

- Autopistas y autovías
- Carreteras nacionales
- Núcleos de población

Proyección cartográfica: ETRS 1989 UTM 30N. Dátum: WGS84.
Fuentes: PNOA, IGN. Elaborado por: Raúl Hoffrén Mansoa.
Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. Junio de 2018.

MODELOS DE COMBUSTIBLE PARA MASAS DE PINUS HALEPENSIS MILL. INCENDIO DE REQUENA (VALENCIA)



Modelos de combustible (Prometheus)

Propagación en arbustos:	Propagación en árboles:
2	5
3	6
4	7

Zonas sin propagación:

Sin combustible

Otros elementos:

- Límite del área de estudio
- Núcleos de población
- Límite provincial

Proyección cartográfica: ETRS 1989 UTM Zona 30N.
 Dátum: WGS 84. Fuentes: PNOA, IGN. Elaborado por:
 Raúl Hoffrén Mansoa. Dpto de Geografía y Ordenación
 del Territorio. Universidad de Zaragoza. Junio 2018.

