

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN EN ZONAS AFECTADAS POR EL FUEGO MEDIANTE DATOS LI- DAR E INFORMACIÓN DE CAMPO

*Autora: Yomaira Quinga Vela*

*Director: Antonio Luis Montealegre Gracia*

**Máster Universitario en**

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

**Noviembre de 2022**



**Universidad  
Zaragoza**

**Departamento de Geografía y Orde-  
nación del Territorio**



## Resumen

*La comunidad autónoma de Aragón tiene un total de 2,5 millones de hectáreas de superficie forestal. Los incendios forestales han experimentado un importante incremento en los dos últimos decenios, por lo que la gestión de las zonas afectadas es fundamental. El objetivo principal del trabajo es analizar cómo se ha recuperado la estructura del bosque en diversos incendios ocurridos en comunidades de pinares mediterráneos y submediterráneos mediante datos de campo y nubes de puntos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Por un lado, se han caracterizado ciento setenta y cuatro incendios ocurridos entre 1967 y 2010 con métricas LiDAR (altura media, desviación estándar, percentil 99, canopy cover y canopy relief ratio). Por otro lado, se han utilizado treinta y tres áreas test distribuidas en diecisiete grandes incendios que tuvieron lugar entre 1970 y 2008. Cada una de las áreas test se compone de un sector quemado, localizado dentro del perímetro del incendio, y de un sector no quemado o control. El diagnóstico de la vegetación en campo se ha llevado a cabo mediante un inventario florístico y fisionómico de los estratos que conforman cada comunidad de pinar. Se han utilizado los datos LiDAR para calcular las métricas de densidad y cerramiento vegetal de cada área test. Para evaluar la magnitud de las diferencias estructurales a nivel de incendio y de área test se han aplicado los test de Kruskal-Wallis y de Wilcoxon Rank-Sum, respectivamente. Con el fin de representar cartográficamente la estructura de las formaciones vegetales quemadas, se ha utilizado la información de recubrimiento por estrato para generar composiciones de color Rojo-Verde-Azul. Asimismo, se ha realizado un análisis clúster y una clasificación digital supervisada para cartografiar las formaciones vegetales que colonizan las zonas quemadas. Los resultados muestran que las comunidades vegetales que surgen tras el fuego presentan menor recubrimiento medio por estrato, quedando muy poco desarrollados los estratos superiores frente a los estratos inferiores. Tanto las composiciones de color como la cartografía de las formaciones vegetales que ocupan los espacios post-incendio, evidencian diferentes ritmos de recuperación vegetal.*

**Palabras clave:** incendio forestal, LiDAR-PNOA, composición de color, clasificación digital, análisis clúster

## Abstract

*The autonomous community of Aragón has a total of 2.5 million hectares of forest area. Forest fires have experienced a significant increase in the last two decades, so the management of affected areas is essential. The main objective of this work is to analyze how the structure of the forest has been recovered in several fires that have occurred in communities of Mediterranean and sub-Mediterranean pine forests using field data and LiDAR point clouds from the National Plan for Aerial Orthophotography. On the one hand, one hundred and seventy-four fires that occurred between 1967 and 2010 have been characterized with LiDAR metrics (mean height, standard deviation, 99th percentile, canopy cover and canopy relief ratio). On the other hand, thirty-three test areas distributed in seventeen large fires that took place between 1970 and 2008 have been used. Each of the test areas is made up of a burned sector, located within the perimeter of the fire, and a non-burned sector or control. The diagnosis of the vegetation in the field has been carried out through a floristic and physiognomic inventory of the strata that make up each pine forest community. The LiDAR data have been used to calculate the metrics of density and plant enclosure of each test area. To evaluate the magnitude of the structural differences at fire level and test area, the Kruskal-Wallis and Wilcoxon Rank-Sum tests were applied, respectively. In order to map the structure of the burned vegetation formations, the coverage information per stratum has been used to generate Red-Green-Blue color compositions. Likewise, a cluster analysis and a supervised digital classification have been carried out to map the plant formations that colonize the burned areas. The results show that the plant communities that arise after the fire have a lower average cover per stratum, with the upper strata being very little developed compared to the lower strata. Both the color compositions and the cartography of the plant formations that occupy the post-fire spaces show different rates of plant recovery.*

**Key Words:** forest fire, LiDAR-PNOA, color composition, digital classification, cluster analysis

## Índice

1. Introducción.....	1
2. Materiales y métodos.....	2
2.1. Área de estudio.....	2
2.2. Datos de campo.....	4
2.3. Datos LiDAR y procesamiento.....	7
2.3.1. Métricas LiDAR a nivel de incendio forestal.....	7
2.3.2. Métricas LiDAR a nivel de área test.....	8
2.4. Análisis de las diferencias estructurales a nivel de incendio y de área test.....	9
2.5. Composiciones de color para la visualización de las diferencias entre estratos a nivel de incendio.....	9
2.6. Análisis clúster y clasificación digital de las formaciones vegetales de los incendios.....	10
2.6.1 Clasificación supervisada.....	10
2.6.2 Análisis clúster de los datos de campo.....	10
2.6.3 Determinación de las variables para la clasificación digital.....	11
3. Resultados y discusión.....	12
3.1. Caracterización y análisis de las diferencias estructurales a nivel de incendio.....	12
3.2. Caracterización y análisis de las diferencias estructurales a nivel de área test.....	12
3.3. Composiciones de color.....	16
3.4. Cartografía de las formaciones vegetales que colonizan los incendios.....	18
4. Conclusiones.....	23
5. Agradecimientos.....	23
6. Bibliografía.....	24

## 1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales en los ecosistemas mediterráneos se han convertido en uno de los problemas ambientales de mayor trascendencia, como consecuencia de su alta recurrencia y magnitud en términos de superficie afectada (Jiménez-Ruano et al., 2016). Algunas especies vegetales cuentan con diversas estrategias eco-fisiológicas para recuperarse tras el fuego, tales como el rebrote, los bancos de semillas persistentes y la capacidad de dispersión. Sin embargo, la alteración del régimen de incendios ha hecho mucho más vulnerables a estos ecosistemas, dificultándose, en ocasiones, su recuperación natural y requiriendo una gestión forestal específica (Viana-Soto et al., 2022).

En España, el análisis de datos históricos confirma que existe un aumento de las hectáreas quemadas por cada GIF (Gran Incendio Forestal) y, considerando que los meses de verano son los que contemplan más GIF, aumenta también el número de eventos ocurridos aún fuera de esta época (Úbeda et al., 2021). De acuerdo con Sánchez (2017), en los años 60 del siglo XX, la industrialización y el éxodo rural motivado por el desarrollo económico, el abandono de cultivos, y el aumento de la combustibilidad de los montes, contribuyeron a un crecimiento de la cubierta vegetal sin control ni mantenimiento y sobre los que, en muchos casos, no se puede actuar porque están en áreas protegidas, como los parques nacionales o naturales. La relación entre abandono de tierras y ocurrencia de incendios no sólo es debida a que se produce un incremento en la cantidad de biomasa acumulada sobre el terreno sino también porque tiene lugar un aumento notable de su continuidad (Rico y Maseda, 2008). Todo esto ha derivado en un incremento de los incendios forestales desde los años 70 en aquellos momentos en que se dan las condiciones climáticas favorables, a pesar del esfuerzo en pistas forestales, cortafuegos, infraestructuras y medios de extinción. A este cambio de usos del suelo y al incremento del riesgo de incendios forestales han contribuido también las repoblaciones de pinar con *Pinus halepensis*, que ocupan un 11% de los bosques españoles, siendo la conífera más xerotérmica y termófila, distribuida principalmente por las provincias mediterráneas donde la repercusión de los incendios es elevada, formando masas con alta capacidad de propagación del fuego por su estructura arbórea, el abundante contenido en piñas y ramas bajas secas así como el cortejo de matas esclerófilas acompañante. Además, su densa regeneración tras el fuego hace que las masas sean más proclives a la ignición.

Durante el decenio 1976- 1985 se registró el mayor número de GIF, con un total de 725, la relación con el largo periodo de sequía que se prolongó entre 1978 y 1983 es alta, afectando especialmente al sur y este peninsular, donde se concentraron mayormente los GIF. Por otro lado, según los datos a nivel nacional la contribución de los grandes incendios al total recorrido por el fuego es dispar en los territorios, teniendo a la comunidad autónoma de Aragón con un 85.46% por el alto peso que representan los grandes incendios forestales en el cómputo global de superficie afectada por el fuego.

En la comunidad, se entiende que los incendios forestales son un fenómeno persistente e incluso creciente. Esta progresión en número de incendios es tal, que llega incluso a duplicarse desde los años 80 hasta la actualidad. Entre 1968 y 2009 más de ciento sesenta mil hectáreas afectadas por un total de incendios que sobrepasa los diez mil, son las cifras globales que resumen el fenómeno en Aragón, conforme a la Estadística General de Incendios Forestales (Lázaro, 2010). Según los resultados del Tercer Inventario Forestal Nacional elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, entre 1994 y 2005 la superficie de monte arbolado de Aragón ha aumentado en 392.000 hectáreas, llegando a cubrir un tercio de la superficie de la comunidad.

La resiliencia al fuego constituye un importante indicador sobre el tiempo que necesita el sistema para alcanzar los valores previos a la perturbación. La teledetección óptica ofrece una poderosa alternativa a los métodos de campo para monitorizar la recuperación forestal basada en la respuesta espectral de la vegetación a múltiples escalas espaciales y temporales (Pérez-Cabello et al., 2021). Por ejemplo, las imágenes del programa Landsat se han convertido en la fuente de información más utilizada (Chuvieco et al., 2020) para generar índices espectrales pre- y post-fuego y llevar a cabo análisis de series de temporales con algoritmos de detección de cambios (Viana-soto et al., 2022). No obstante, los cambios en la estructura de la vegetación también deben ser considerados para una evaluación integral de la

resiliencia forestal al fuego. Los sensores LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) aerotransportados son capaces de registrar la estructura tridimensional de la vegetación y del terreno subyacente usando la tecnología láser (Salamanca Céspedes & Pérez Castillo, 2008; Roussel et al., 2020). Son numerosos los estudios que hacen uso de estos sensores para estimar los atributos del bosque, cuantificar las alteraciones estructurales post-incendio (Gelabert et al., 2020), evaluar la severidad del fuego (Montealegre et al., 2014; García et al., 2020) y analizar la recuperación de la vegetación (Martín-Alcón et al., 2015; Gordon et al., 2017). Por lo tanto, cartografiar y evaluar los espacios forestales con mayor peligro de incendio es importante en el proceso de gestión forestal, además de analizar los procesos y tratamientos orientados a la mitigación de los efectos del fuego, más aún, cuando se prevé que tanto el número, como la intensidad y severidad de estos sigan en aumento (Chuvieco et al., 2008).

En este contexto, el objetivo principal del trabajo es analizar cómo se ha recuperado la estructura del bosque en diversos incendios ocurridos en comunidades de pinares mediterráneos y submediterráneos (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus nigra* Arnold y *Pinus sylvestris* L.) mediante datos de campo y nubes de puntos LiDAR de baja densidad. Los objetivos específicos que se derivan del anterior son: a) caracterizar estructuralmente los incendios del área de estudio; b) evaluar la magnitud de las diferencias estructurales entre las zonas quemadas y control; c) comparar las diferencias entre estratos de vegetación mediante composiciones en falso color creadas a partir de métricas LiDAR; d) cartografiar la estructura vegetal de los incendios mediante métricas LiDAR e información de campo.

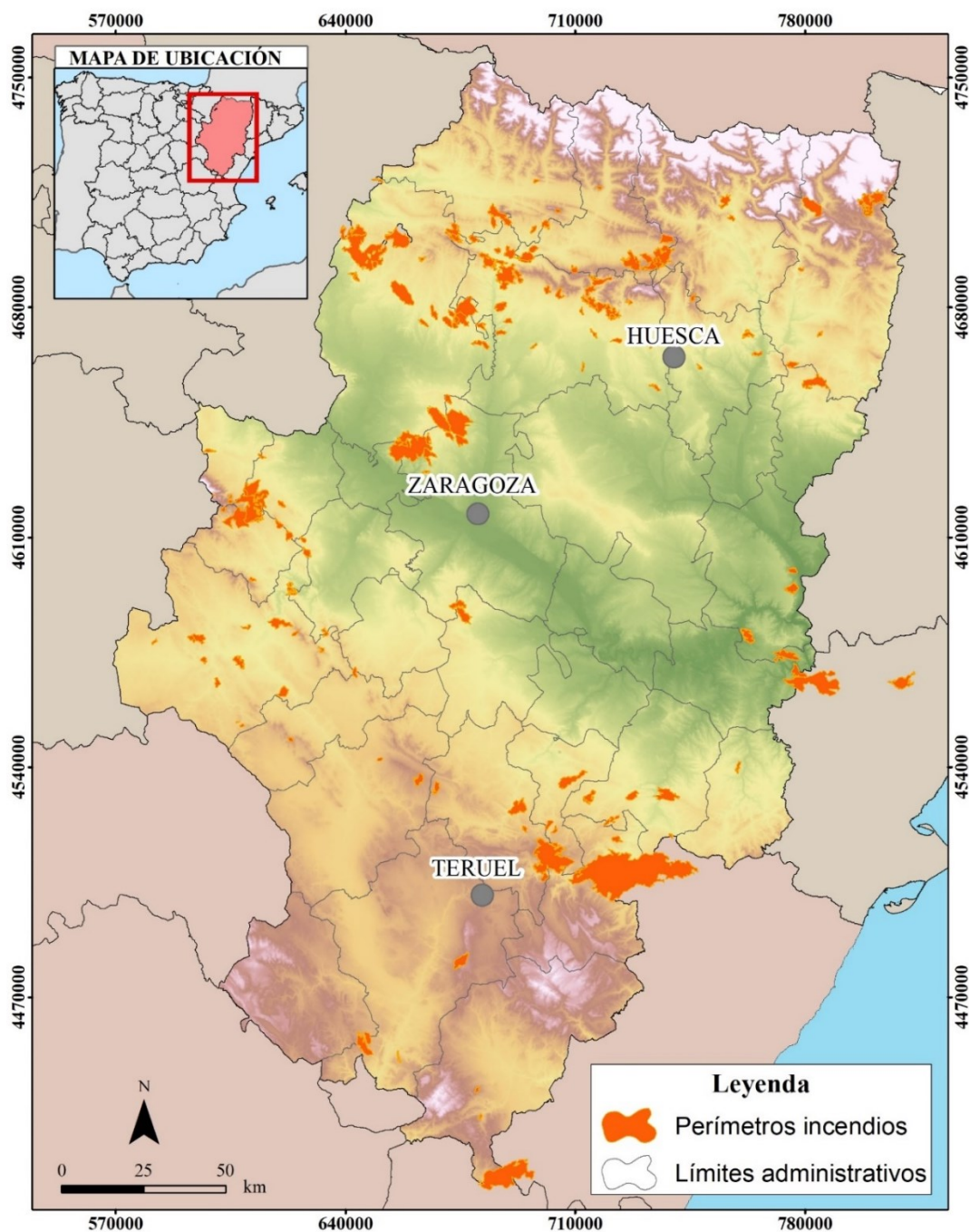
## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde con ciento setenta y cuatro incendios ocurridos entre 1967 y 2010 (Figura 1), que se distribuyen por toda la Comunidad Autónoma de Aragón. De ellos, se han seleccionado diecisiete incendios de más de 200 ha ocurridos entre 1970 y 2008, localizados en el sector noroccidental y central de Aragón (Figura 2). Los perímetros proceden de la base de datos de incendios forestales del Gobierno de Aragón (Dirección General de Gestión Forestal) y de productos cartográficos obtenidos mediante técnicas de teledetección en el marco del proyecto de investigación GA-LC-042/2011 (Caixa-DGA) (Jiménez-Ruano et al., 2016). Estos incendios se pueden agrupar en tres grandes marcos geográficos:

- Incendios localizados en las sierras occidentales del Prepirineo oscense y zaragozano: estas zonas poseen altitudes que sobrepasan los 1000 m en la mayoría de los casos. La mayor parte de la zona presenta una topografía muy abrupta y los cauces principales, en muchas ocasiones, muestran alineaciones E-O. La vegetación se caracteriza por espacios cubiertos por comunidades de carácter submediterráneo dominadas por *Quercus gr. cerrroides* (Willk y Costa) y, en menor medida, por *Quercus ilex* L.; pinares de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* (Arnold) y formaciones arbustivas dominadas por *Buxus sempervirens* L., *Genista scorpius* L., etc. La topografía abrupta de la zona puede tener un papel relevante en la propagación del fuego, haciendo de mecanismo de disparo para la generación de un incendio convectivo, aunque también pueden producirse incendios relativamente importantes bajo situaciones de oeste u ondas largas de NO, en este caso, guiados principalmente por viento.
- Incendios del sector central del valle del Ebro: comprende las zonas delimitadas por la cuenca del Ebro y sus muelas. Es un área de altitud baja, con una mayoría del territorio por debajo de los 450 m-500 m. Toda la zona pertenece al piso mesomediterráneo, con un amplio rango de altitudes y diversos ambientes y ombroclimas, desde el semiárido, hasta el subhúmedo, lo que nos da unos tipos de vegetación relativamente variados. Las condiciones de sequedad favorecen las formaciones arbóreas dominadas por *Pinus halepensis* L., acompañadas por *Q. coccifera* L. y otras especies típicas del matorral mediterráneo y pastizales xerofíticos. En cuanto al régimen de incendios, se puede hablar de una gran influencia topográfica del Valle del Ebro y que provoca la existencia de dos direcciones de propagación claramente dominantes respecto a las demás. Por un lado, propagación procedente de E-SE (bochorno) y por el otro, propagación procedente de NO (cierzo).

- Incendios ubicados en el Sistema Ibérico aragonés: son zonas que poseen una altitud bastante variable, aunque prácticamente toda la zona se encuentra por encima de los 500 m de altitud, llegando hasta los 2000 m. Predominan altitudes en el intervalo de 800-1300 m. La zona está surcada por diferentes sierras, generalmente de alineación noroeste-sureste. También discurren por ella cauces de diversa amplitud y diferentes alineaciones. Se diferencian varios pisos bioclimáticos de la región mediterránea: crioromediterráneo, oromediterráneo, supramediterráneo y mesomediterráneo, dando lugar a una vegetación dominada por matorrales incluidos en la alianza mediterránea *Rosmarino-Ericion*, encinares y plantaciones de *Pinus pinaster* (Aiton) y *Pinus halepensis* L.



**Figura 1.** Localización de los incendios forestales.

Entre los incendios con mayor superficie afectada destacan los siguientes: Sos del Rey Católico-Uncastillo (11) de 1994, con 7.992,79 ha; Las Peñas de Riglos-Loarre-Murillo de Gállego (17) con 3.278,12 ha; los incendios del municipio de Zuera de 1995 (3) y 2008 (5) con 3.823,19 ha y 2.514,05 ha respectivamente. Por el contrario, los incendios de Encinacorba (4) del 2003 con 278,19 ha, y Las Peñas de Riglos-Longás (7) del 2000 con 288,57 ha son los de menor superficie afectada.

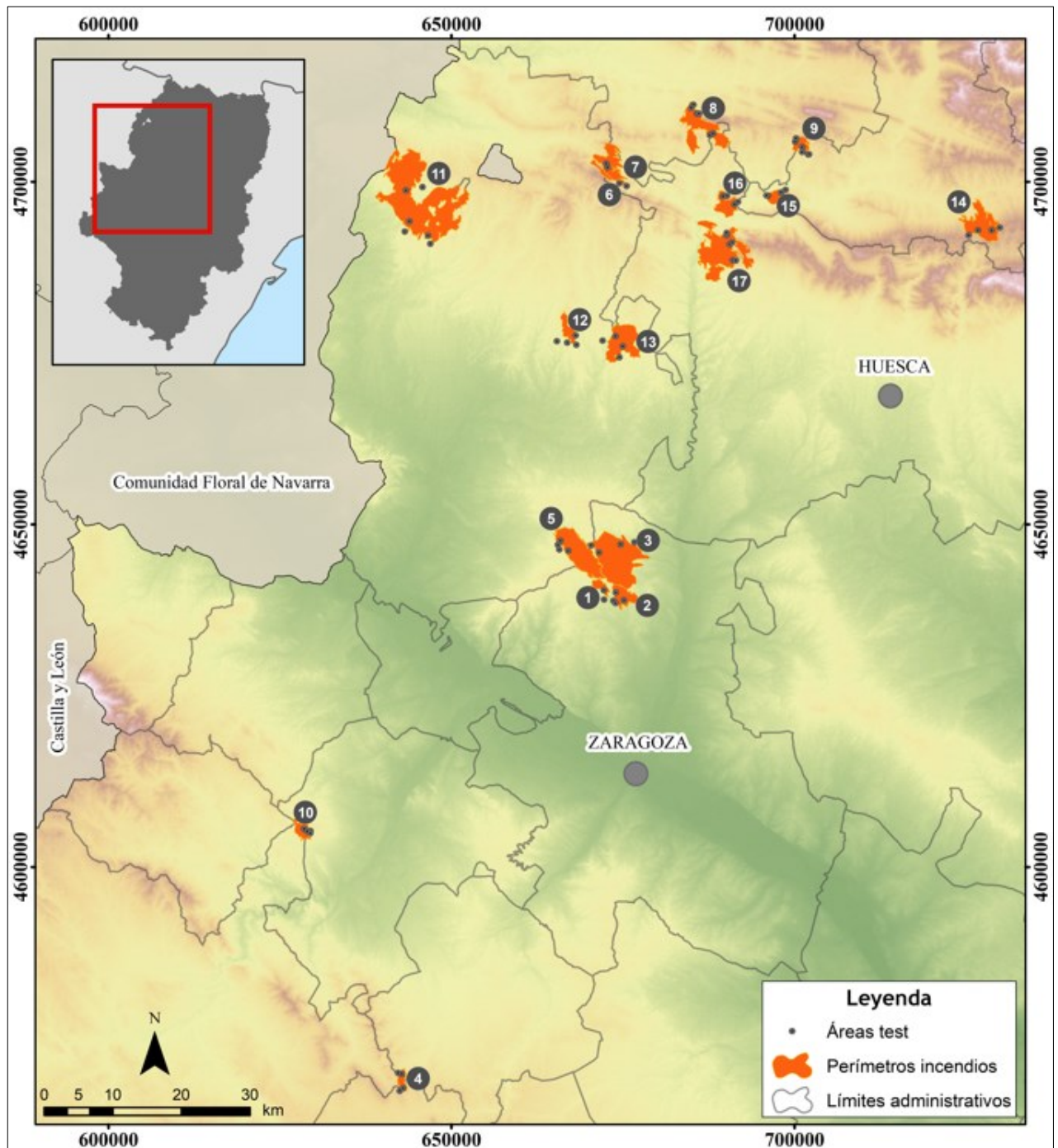
Desde el punto de vista de la estrategia reproductiva tras el fuego, esta muestra de ecosistemas contiene especies vegetales con tres tipos básicos de respuesta (Jiménez-Ruano et al., 2016): reclutados obligados dominados por *P. halepensis*, que posibilitan una recolonización de tipo endógeno; sistemas pasivos de defensa de germinación exógena, como las comunidades dominadas por *P. nigra* y *P. sylvestris* y; rebrotadores obligados mediante yemas adventicias, que reúnen a fanerófitos y macro-fanerófitos pertenecientes al género *Quercus* (*Q. ilex*, *Q. gr. cerrioides*, *Q. coccifera*).

## 2.2. Datos de campo

Se han utilizado 33 áreas test (AT) distribuidas en diecisiete incendios seleccionados (Tabla 1). Su localización tiene en cuenta la variabilidad de la zona en función de diferentes variables: formación vegetal, topografía, litología y accesibilidad. Cada AT se compone de un sector quemado (SQ), localizado dentro del perímetro del incendio, y de un sector no quemado o control (SC), ubicado fuera del incendio, ambos de 100 m<sup>2</sup> de superficie (Figura 2).

**Tabla 1.** Listado de incendios con sus correspondientes áreas test, municipio, año y área.

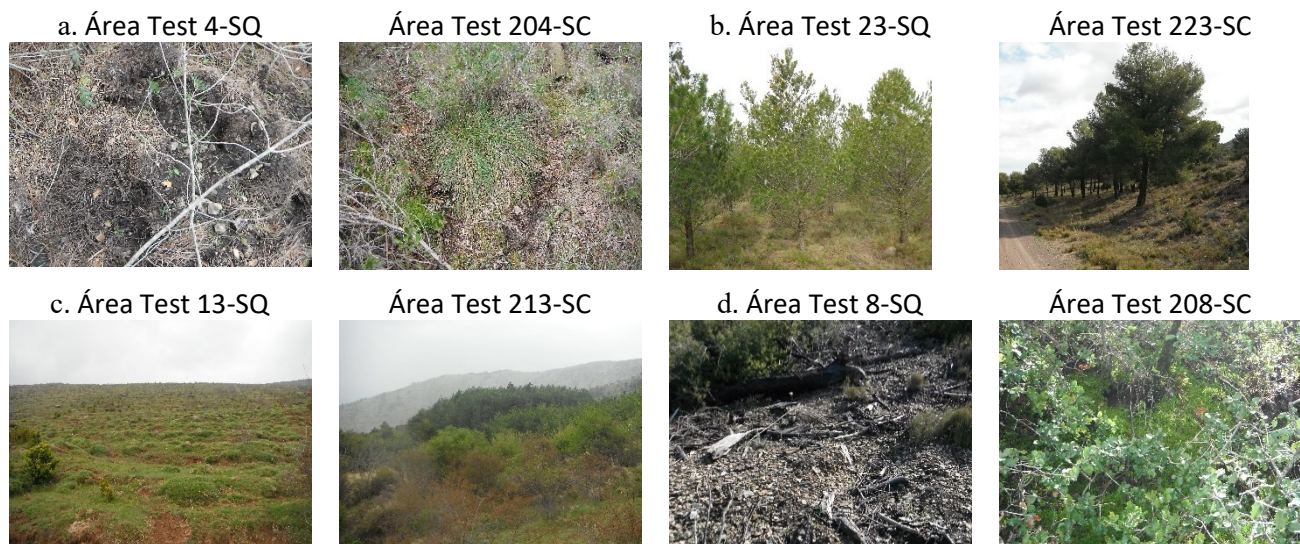
Nº	ID área test Sector quemado	ID área test Sector control	Municipio	Año del incendio	Área afectada (ha)
1	1	101	Zuera	1970	308,31
2	2	202	Zuera	1979	758,80
	3	203			
3	4	204	Zuera	1995	3.823,19
	5	205			
4	6	206	Encinacorba	2003	278,19
	7	207			
5	8	208	Zuera	2008	2.514,05
	9	209			
6	12	212	Las Peñas de Riglos-Longás	1990	425,09
7	13	213	Las Peñas de Riglos-Longás	2000	288,57
8	17	217	Bailo-Jaca-Las Peñas de Riglos	1994	1.813,64
	18	218			
	19	219			
9	20	220	Caldearenas-Jaca	1986	419,94
	21	221			
	22	222			
10	23	223	Épila-Nigüella	1994	431,12
	24	224			
11	25	225	Sos del Rey Católico-Uncastillo	1994	7.992,79
	26	226			
12	30	300	Luna-Orés	1979	472,01
	31	301			
13	32	302	Agüero-Luna	1978	1.808,97
	33	333			
14	36	336	Sabiñánigo-Nocito	1986	1.706,40
	38	338			
15	39	339	Caldearenas	1986	361,70
	52	502			
16	40	400	Caldearenas-Las Peñas de Riglos	1985	734,76
	41	401			
17	42	402	Las Peñas de Riglos-Loarre-Murillo de Gállego	2001	3.278,12
	45	405			



**Figura 2.** Ubicación de los diecisiete incendios seleccionados con sus respectivas áreas test.

En estos sectores se realizó, entre abril y junio del año 2013, un diagnóstico de la vegetación mediante inventarios florísticos y fisionómico-estructurales siguiendo la metodología de Bertrand (1966). Para este trabajo se ha utilizado el porcentaje de recubrimiento vegetal estimado en los siguientes estratos (E): E1 - arbóreo (>5 m); E2 - arborescente (3 m a 5 m); E3 - arbustivo (1 m a 3 m); E4 - subarbustivo (0,5 m a 1 m); y E5 - herbáceo (<0,5 m).





**Figura 3.** Fotografías de las AT de los incendios (a) Zuera,1995, (b) Épila- Nigüella, 1994, (c) Las Peñas de Riglos-Longás, 2000, (d) Zuera, 2008. Fuente: proyecto de investigación GA-LC-042/2011 (Caixa-DGA).

En la Tabla 2 se muestra el valor del porcentaje del recubrimiento vegetal estimado en campo en cada uno de los estratos y la comunidad a la que pertenece la vegetación (PH-*Pinus halepensis* y PSn-*Pinus nigra*). Los muestreos de AT corresponden a un punto dentro del incendio y su correspondiente fuera, así se emparejan por el número de ficha.

**Tabla 2.** Porcentaje de recubrimiento vegetal por estrato en las AT.

Ficha	Comunidad	E1	E2	E3	E4	E5	Ficha	Comunidad	E1	E2	E3	E4	E5
001	PH	0	0	25	50	63	101	PH	45	10	57	60	80
002	PH	0	8	75	40	40	202	PH	20	45	35	50	85
003	PH	0	0	20	90	15	203	PH	20	45	35	50	85
004	PH	0	95	5	5	5	204	PH	0	0	85	32	20
005	PH	0	0	85	32	20	205	PH	40	7	20	20	45
006	PH	0	0	20	35	50	206	PH	65	8	20	5	75
007	PH	0	0	5	50	90	207	PH	85	0	4	10	95
008	PH	0	0	25	57	65	208	PH	65	20	20	70	20
009	PH	0	0	55	20	60	209	PH	80	8	55	20	60
012	PSn	0	5	70	47	55	212	PSn	87	14	20	17	88
013	PSn	0	0	10	15	75	213	PSn	92	16	15	16	6
017	PSn	0	6	18	17	85	217	PSn	60	10	30	8	30
018	PSn	0	5	52	52	90	218	PSn	32	15	36	22	70
019	PSn	0	3	75	20	95	219	PSn	70	8	75	7	40
020	PSn	0	10	70	43	60	220	PSn	75	10	70	40	95
021	PSn	8	13	56	30	73	221	PSn	85	10	16	25	63
022	PSn	0	4	27	40	35	222	PSn	85	13	37	20	45
023	PH	0	43	3	12	90	223	PH	10	25	3	25	90
024	PH	0	0	0	8	90	224	PH	10	40	8	3	40
025	PH	0	3	90	9	22	225	PH	75	7	18	26	62
026	PH	0	20	58	50	20	226	PH	35	0	19	25	20
030	PH	5	0	48	35	50	300	PH	70	0	45	32	53
031	PH	8	65	60	22	94	301	PH	45	21	71	40	96
032	PH	75	32	24	10	85	302	PH	40	16	67	10	45
033	PH	8	13	87	55	0	333	PH	35	0	50	11	60

Ficha	Comunidad	E1	E2	E3	E4	E5	Ficha	Comunidad	E1	E2	E3	E4	E5
036	PSn	0	0	10	17	90	336	PSn	93	23	20	3	30
038	PSn	0	0	23	17	85	338	PSn	85	37	35	20	28
039	PSn	0	4	40	60	75	339	PSn	80	70	68	58	12
040	PSn	0	0	10	11	70	400	PSn	18	43	45	40	53
041	PSn	1	1	2	21	100	401	PSn	40	6	18	19	95
042	PSn	0	0	85	20	10	402	PSn	95	25	35	20	20
045	PSn	0	3	90	7	22	405	PSn	50	6	62	20	55
052	PSn	4	10	32	60	40	502	PSn	60	17	60	10	40

### 2.3. Datos LiDAR y procesamiento

Los datos LiDAR fueron capturados entre marzo 2009 y abril del 2012, por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), correspondientes a los planes de vuelo: 2008-2011 Cataluña: de marzo 2009 a septiembre 2011, 2010 Aragón sur: de julio 2010 a enero de 2011, 2010 Aragón norte: de septiembre 2010 a noviembre 2011 y finalmente Navarra sur: de marzo 2012 a abril 2012. Se utilizaron sensores aerotransportados de pulsos discretos de huella pequeña (LEICA ALS50-II y ALS60), con una densidad nominal de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>, y una precisión vertical de 0,40 m. La distribución de esta información se realiza a través del Centro Nacional de Información Geográfica (IGN) en ficheros de 4 km<sup>2</sup> de extensión con sistema de referencia ETRS89, proyección UTM y huso 30N y 31 N en formato LAZ. Las nubes de puntos LiDAR se encuentran clasificadas de acuerdo con la nomenclatura del formato binario LAS de la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) en las siguientes clases: suelo, vegetación baja, media y alta, construcciones, ruido, solape, y no clasificado.

El tratamiento inicial de los datos se ha llevado a cabo con la herramienta *LAS/LAZ Converter* desarrollada por el Gobierno de Navarra para la descompresión de los ficheros y la eliminación de clases inservibles, como el ruido y el solape. Posteriormente, el cálculo de variables estructurales de la vegetación (métricas estadísticas) se ha efectuado con el software FUSION v. 4.40 del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (McGaughey, 2022). Se trata de un software libre cuyos comandos se establecen a través de códigos que contienen: el nombre de la herramienta, directorios de salida y de entrada y las características o especificaciones mediante el uso de *switches*. Estos códigos se ejecutan desde el símbolo de sistema o mediante el uso de archivo de lotes (Gayo, 2019).

#### 2.3.1. Métricas LiDAR a nivel de incendio forestal

Para caracterizar estructuralmente los ciento setenta y cuatro incendios del área de estudio (ver Anexo), se han derivado un conjunto de métricas basadas en la distribución de las alturas de los retornos láser, las variables utilizadas están relacionadas con la estructura de la vegetación, de acuerdo con los resultados obtenidos por Gelabert et al. (2020): altura media (ecuación 1), desviación estándar (ecuación 2), percentil 99 (P99) (ecuación 3), *Canopy Cover* (CC) (ecuación 4) y *Canopy Relief Ratio* (CRR) (ecuación 5), donde  $x_i$  es el valor de la altura del retorno,  $N$  es el número total de observaciones,  $r_{i \text{ first}}$  es el primer retorno, para el CC se utilizó un umbral de 0,2 m de altura para evitar retornos al suelo (Jennings, Brown y Sheil 1999).

La altura media y el percentil 99 caracterizan el dosel arbóreo, la desviación típica se refiere a la variabilidad vertical que presenta el dosel, mientras que los porcentajes de retornos por encima de un determinado umbral de altura se relacionan con la densidad y la cobertura del estrato arbóreo.

$$\text{Altura media} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Desviación típica} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_n)^2}{N}} \quad \text{Eq. 2}$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ first}} > 0.2m}{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ first}}} \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

$$CRR = \frac{\bar{x} - x_{i \text{ min}}}{x_{i \text{ max}} - x_{i \text{ min}}} \quad \text{Eq. 4}$$

Para el cálculo del percentil 99 se utiliza la siguiente fórmula, donde P es el percentil dividido entre 100 y N es el número de observaciones: Eq. 5

$$(N - 1)P = I + d \left\{ \begin{array}{l} I \text{ es la parte entera de } (N - 1)P \\ d \text{ es la parte decimal de } (N - 1)P \end{array} \right.$$

Si:

$$d = 0 \rightarrow P = x_{i+1}$$

Si:

$$d > 0 \rightarrow P = x_{i+1} + d(x_{i+2} - x_{i+1})$$

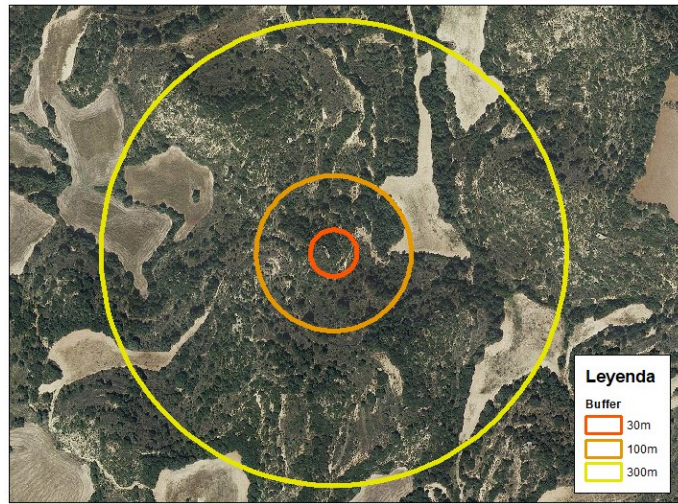
Todas estas métricas se han calculado con el comando “*GridMetrics*”, el cual genera como resultado un archivo de texto en formato CSV. Para convertirlo a un formato ráster se ha utilizado el comando “*CSV2grid*” con una resolución de 15 m. Se ha optado por esta resolución espacial porque se considera adecuada teniendo en cuenta la baja densidad de los datos LiDAR y el tipo de vegetación. Cabe señalar que ha sido necesario el uso de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) de 5 m de resolución espacial disponibles en el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) con el fin de normalizar los valores de altura de los retornos láser. Finalmente, para extraer la información de cada una de las métricas delimitadas por los perímetros de los incendios se ha utilizado la herramienta “*Zonal Statistics as Table*” del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcMap 10.7.1.

### 2.3.2. Métricas LiDAR a nivel de área test

Para evaluar la magnitud de las diferencias estructurales entre las zonas quemadas y control de las Áreas Test (AT) se calcularon, a partir de las nubes de puntos, dos métricas: densidad vegetal (DV) y cerramiento del dosel vegetal (CD). Por un lado, la primera se ha obtenido utilizando el comando “*DensityMetrics*”. La DV, que se expresa en porcentaje, se define como la proporción de retornos de vegetación en cada uno de los estratos descritos anteriormente respecto del total de retornos de vegetación dentro de una celda dada. Esta métrica sirve para indicar el grado de dominancia de un estrato vegetal frente a otro. Para su cálculo ha sido necesario el uso de los MDE de 5 m de resolución espacial con el fin de normalizar los valores de altura de los retornos láser. Una vez obtenidas las capas ráster de DV a una resolución espacial de 15 m para cada estrato en formato DTM, el comando “*DTM2ASCII*” se ha utilizado para convertirlas en formato ASCII, que es legible por ArcMap 10.7.1.

A continuación, se ha realizado una extracción de valores de DV por estratos en ArcMap a partir de las coordenadas de los centroides de los SQ y SC con tres tamaños diferentes (30 m, 100 m y 300 m) (Figura 4), con el propósito de analizar que dimensiones se ajustan mejor a los datos de campo obtenidos en las AT.

Por otro lado, la métrica de cerramiento del dosel vegetal (CD), expresada en porcentaje, se ha obtenido mediante el comando “*Cover*”, que calcula la proporción de primeros retornos por encima de un umbral de altura determinado por cada estrato respecto del total de retornos (incluidos los de suelo) en una celda. Al igual que en el caso del cálculo de la DV, se ha adoptado una resolución espacial de 15 m y las capas ráster resultantes para cada estrato se han convertido a formato ASCII para poder realizar una extracción de valores a diferentes tamaños en ArcMap 10.7.1.



**Figura 4.** Buffer de análisis de 30 m, 100 m y 300 m.

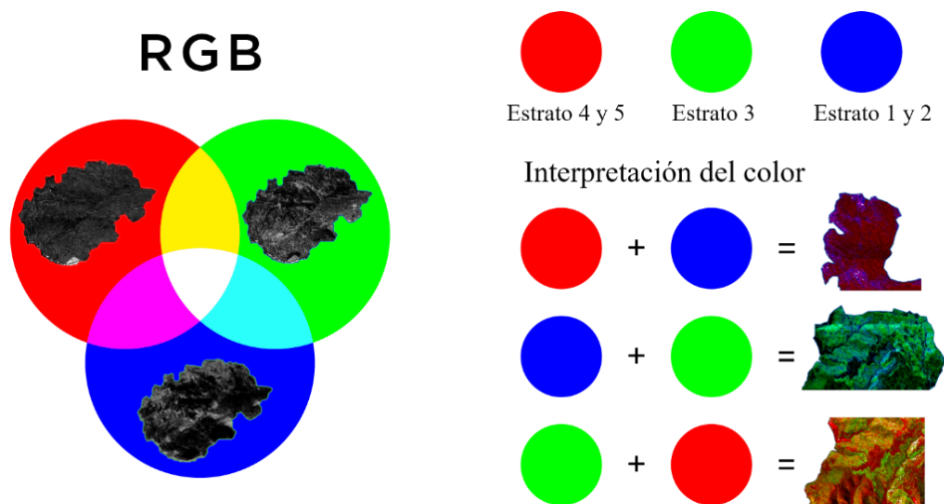
#### 2.4. Análisis de las diferencias estructurales a nivel de incendio y de área test

Para evaluar las diferencias estructurales entre incendios, se han agrupado en 5 categorías según el año de ocurrencia (1960-1970, 1970-1980, 1980-1990, 1990-2000 y 2000-2010), y se ha aplicado la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Este test permite contrastar si es estadísticamente significativa la relación entre una variable categórica y una variable cuantitativa/ordinal, independientemente del número de modalidades que tenga la variable categórica. Intuitivamente, es idéntico al ANOVA con los datos reemplazados por categorías, la prueba no asume normalidad en los datos, en oposición al tradicional ANOVA.

Por otro lado, dada la estructura pareada de las observaciones (cada observación en una zona quemada tiene su correspondencia en un área control no quemada) y la ausencia de normalidad de la muestra, se ha utilizado la prueba de suma de rangos Wilcoxon, que es un test no paramétrico para comprobar la heterogeneidad de dos muestras independientes. Dicho análisis estadístico se ha llevado a cabo con los valores de recubrimiento vegetal estimados en campo, y con los valores extraídos de las métricas de densidad y de cerramiento vegetal

#### 2.5. Composiciones de color para la visualización de las diferencias entre estratos a nivel de incendio

Para sintetizar y representar cartográficamente la estructura de las formaciones vegetales colonizadoras de las zonas incendiadas, se ha utilizado la información de recubrimiento por estrato y su proyección en dispositivos digitales de visualización para generar composiciones de color Rojo-Verde-Azul (en inglés, Red-Green-Blue; RGB) basadas en el proceso aditivo de formación del color (Figura 5).



**Figura 5.** Composiciones de color para la visualización de los estratos de vegetación.

En este caso, en el rojo se ha proyectado el sumatorio de los recubrimientos de los estratos 5 y 4 (los de menor porte); en el verde, la información del estrato arbustivo (1-3 m) y en el azul, el sumatorio de la información de los estratos superiores (>3 m). Teniendo en cuenta la distribución y asignación de los niveles de recubrimiento por estrato, el blanco se asociaría a cubiertas que muestran proporcionalmente alto recubrimiento en los tres estratos. El descenso proporcional en el recubrimiento daría lugar a la gama de grises hasta llegar al negro, que representaría zonas en las que no hay vegetación.

## 2.6. Análisis clúster y clasificación digital de las formaciones vegetales de los incendios

### 2.6.1 Clasificación supervisada

Para realizar una clasificación supervisada es necesario contar con cierto conocimiento del área de estudio, ya sea por ayuda de expertos o trabajos en campo, permitiendo delimitar sobre la imagen zonas representativas de cada clase de la leyenda, conocida como puntos de entrenamiento, es así como se calcula los niveles digitales de cada clase, para posteriormente designar a los píxeles restantes de la imagen. De acuerdo con Chuvieco (2008), la máxima probabilidad o máxima verosimilitud es un método paramétrico en el que el píxel se designa a la clase con la que tiene mayor probabilidad de pertenencia, de acuerdo a una distribución normal a partir de la media y la matriz de varianza-covarianza. Este proceso se realizó en el software ENVI v.5.6.3.

Para validar la cartografía obtenida es necesario un proceso de evaluación de la exactitud temática, que es al grado en que el mapa generado de cobertura se relaciona con el insumo empleado de referencia para la clasificación, para ello se debe generar un muestreo de puntos de verificación obtenidas ya sea a partir de observaciones de campo, análisis de imágenes o mapas de cobertura proporcionados por instituciones oficiales que garanticen su confiabilidad (Galindo et al., 2014). En este caso, los datos de verificación se obtuvieron digitalizando un total de 85 puntos en base a la ortofoto del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del año 2012, este insumo cuenta con una resolución espacial de 50 cm, el proceso se llevó a cabo en el software ArcGIS 10. 7.1.

Una vez obtenidos los puntos de testeo se los relaciona a través de la matriz de confusión, como parte del proceso de post-clasificación, proceso realizado en el software ENVI v.5.6.3. Esta matriz es bidimensional de tamaño  $n \times n$  donde las filas representan las categorías test obtenidas de la cobertura real y las columnas están dadas por las clases obtenidas de la clasificación; con el objetivo de identificar el grado de exactitud global y entre categorías, a través del cálculo de los errores de omisión (píxeles que el usuario asignó y no coinciden con la asignación resultante del clasificador) y de comisión (píxeles que el clasificador considera pertenecen a una clase y no fue considerado por el usuario).

Otro indicador que evalúa la proporción de coincidencias resultantes de productos cartográficos categóricos con dos o más clases es el índice *Kappa*, siendo una medida obtenida a partir de la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación con un software y la exactitud de la clasificación visual (en campo u otros insumos). Un índice *Kappa* igual a cero corresponde a una causa aleatoria; por el contrario, con un valor igual a 1 se obtiene una máxima concordancia (Borràs et al., 2017).

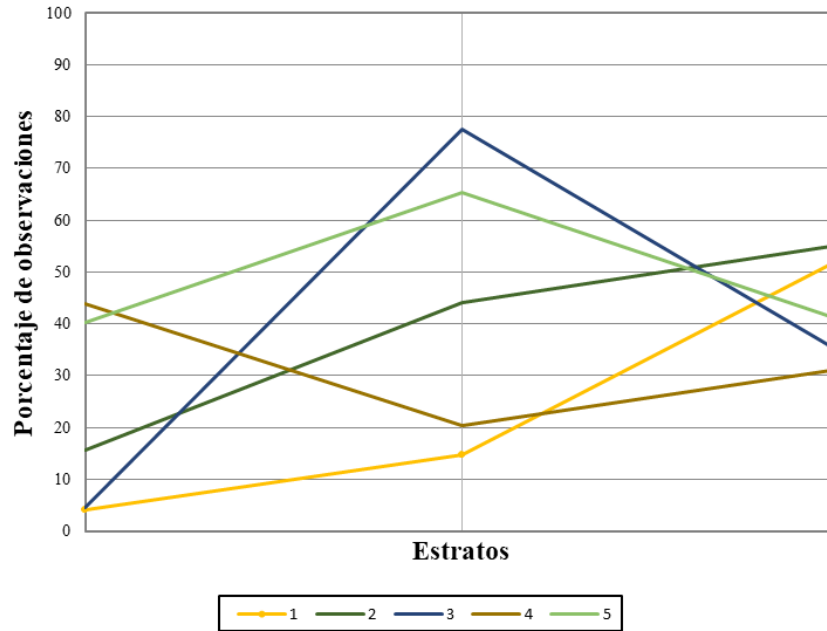
### 2.6.2 Análisis clúster de los datos de campo

Para el análisis clúster, se empleó el algoritmo *K-means* en R. Este es un modelo de clasificación no supervisado, en que no se conoce de antemano las clases a la que pertenecen los datos, sino que es trabajo del modelo encontrar semejanzas entre ellos y así agruparlos o clasificarlos según las características intrínsecas de sus variables. El funcionamiento del algoritmo se puede resumir de la siguiente forma:

1. Define un total de  $k$  centroides al azar.
2. Calcula las distancias de cada uno de los puntos de entrada a los  $k$  centroides, y asigna cada punto al centroide cuya distancia sea menor.
3. Actualiza la posición de los  $k$  centroides, calculando la posición promedio de todos los puntos que pertenecen a cada clase.

4. Repite los pasos 2 y 3 hasta que los centroides no cambien de posición y, por lo tanto, las asignaciones de puntos entre clases no cambien.

En este sentido se definieron 5 categorías para el análisis de las 70 áreas test, los valores que se emplearon son los correspondientes al porcentaje de cobertura reorganizados en 3 grupos: el primer grupo corresponde a la vegetación >3m (E12), el grupo 2 representa la vegetación arbustiva entre 1 m y 3 m (E3) y el último grupo (E45) vegetación inferior a 1 m.



**Figura 6.** Análisis clúster de las cinco categorías.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento de cada categoría de clasificación: la clase 1 tiene una baja frecuencia de observaciones en E12 y E3, pero sus valores incrementan en la clase E45, por lo tanto, corresponde a la vegetación menor a 1 m. La clase 2 presenta valores bajos en E12, llegando aproximadamente al 50% de las observaciones en el E3 y aumentando sus valores en el último grupo. La clase 3 tienen valores altos en E3, correspondiente a la vegetación arbustiva. La clase 4 presenta el valor más alto en E12, decreciendo hasta llegar al 20% de las observaciones en el E3 y subiendo en 10 puntos para el E45. La clase 5 tiene valores similares entre los estratos E12 y E45, alcanzando el pico máximo en el E3. Por lo tanto, la asignación de las categorías se determina tal como se indica en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Asignación de categorías.

Clase	Categoría
1	Matorral poco desarrollado
2	Matorral desarrollado
3	Matorral arbustivo
4	Arbolado maduro
5	Arbolado joven

### 2.6.3 Determinación de las variables para la clasificación digital.

Para la clasificación digital la imagen utilizada está compuesta de 3 bandas. Las bandas se derivan de las métricas LiDAR obtenidas de los ciento setenta y cuatro incendios del área de estudio. Una vez obtenidas las bandas de altura media, desviación estándar, percentil 99 (P99), *Canopy Cover* (CC) y *Canopy Relief Ratio* (CRR) es necesario determinar la correlación que existe entre estas variables para así obtener mejores resultados en el proceso de clasificación.

Para la verificación de la independencia estadística de las variables se emplea el coeficiente de correlación de Spearman que se explica como una medida no paramétrica que calcula la fuerza y la dirección de la asociación entre dos variables clasificadas. El coeficiente Spearman puede tomar un valor entre +1 y -1 y se interpreta así: los valores cercanos a +1, indican que existe una fuerte asociación entre las clasificaciones, o sea que a medida que aumenta un rango el otro también aumenta; los valores cercanos a -1 señalan que hay una fuerte asociación negativa entre las clasificaciones, es decir que, al aumentar un rango, el otro decrece.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización y análisis de las diferencias estructurales a nivel de incendio

La Tabla 4 muestra los valores promedio de cada métrica para las cinco décadas analizadas. Se observa que los valores de 1960-1970 son los más altos de todo el período temporal estudiado, salvo en el caso de la desviación estándar. Esto evidencia que cuanto más tiempo haya transcurrido entre la fecha del incendio y la fecha de captura de la información LiDAR, mayor será el nivel de regeneración de la vegetación.

**Tabla 4.** Valores medios de las métricas LiDAR por décadas.

	Década				
	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2010
P99 (m)	4,35	4,33	3,78	2,96	2,85
Altura Media (m)	2,33	1,99	1,61	1,22	1,31
Desviación típica (m)	0,97	1,21	1,17	0,75	0,76
<i>Canopy Cover</i> (%)	86,87	62,16	53,08	48,40	34,48
<i>Canopy relief ratio</i>	0,44	0,34	0,33	0,31	0,34

La métrica que mejor se ajusta a este comportamiento es la cubierta del dosel (*canopy cover*) que para 1960-1970 tiene un valor de 86,87% y para 2000-2010 su valor decrece llegando a 34,48%. Respecto a la altura media, en el primer periodo tiene un valor de superior a los 2 m, que progresivamente va decreciendo hasta los 1,31 m. Los valores de CRR no presentan variaciones significativas entre las distintas décadas.

Respecto al test Kruskal-Wallis, aplicado para determinar si existen diferencias significativas entre las décadas, confirma que no todas las medianas de la muestra son iguales para todas las métricas analizadas (Tabla 5). Por consiguiente, las métricas resultan adecuadas para caracterizar y diferenciar los incendios según el período temporal en el que se produjeron. Cabe señalar que la severidad de los incendios determina el grado de afectación de la vegetación. Asimismo, es necesario tener en cuenta las características previas de la vegetación quemada y sus posibilidades de regeneración natural para poder conocer la magnitud real de los daños producidos, la importancia del incendio y las condiciones para la restauración del ecosistema (Vales et al., 2020).

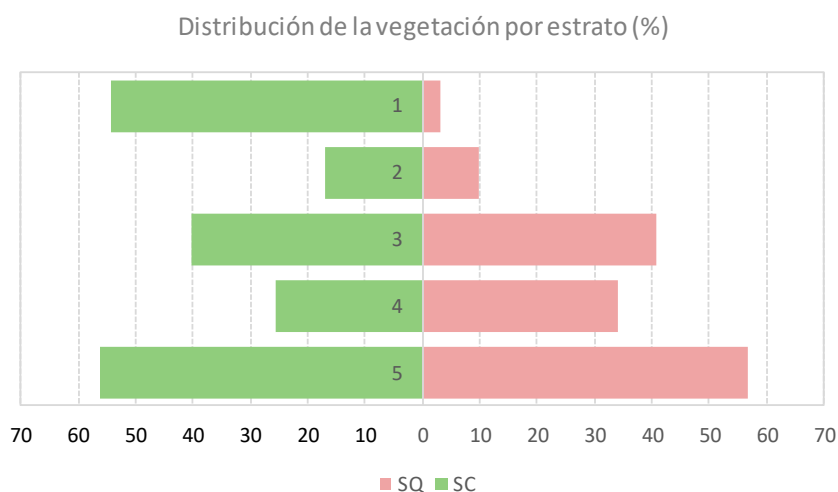
**Tabla 5.** Métricas LiDAR y significación del test de Kruskal-Wallis (N=174).

	P99 (m)	Altura media (m)	Desviación típica (m)	<i>Canopy Cover</i> (%)	<i>Canopy relief ratio</i>
Chi-cuadrado	28,35	28,66	25,90	34,83	12,22
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,016

#### 3.2. Caracterización y análisis de las diferencias estructurales a nivel de área test

Como se muestra en la Figura 7, se puede afirmar que las comunidades vegetales que surgen tras el fuego presentan tres características: menor recubrimiento medio por estrato, muy poco desarrollo de

los estratos superiores y mayor desarrollo de los estratos inferiores en relación con los que muestran las comunidades de las que proceden. Desde el punto de vista fisionómico, en los SC el recubrimiento promedio por estrato, sin distinguir entre tipo de pinar, se sitúa en un 38,20%, es decir, diez puntos por encima con respecto a los sectores quemados (28,90%). Este diferente protagonismo de la vegetación, en términos de superficie ocupada, no se reproduce de igual manera en cada uno de los estratos, de hecho, en algunos de ellos la vegetación regenerada tiene un mayor protagonismo. Este último extremo se relaciona con uno de los efectos más persistentes en los ecosistemas afectados por el fuego: la desarticulación fisionómica de las formaciones afectadas independientemente del tipo de comunidad vegetal (Angeler & Allen, 2016). Se puede reseñar el decremento generalizado en los niveles de recubrimiento vegetal -porcentajes acumulados por estratos- y el mayor desarrollo de los estratos inferiores, muestras evidentes del todavía inconcluso proceso de recuperación y del menor grado de evolución de las formaciones reconstruidas.



**Figura 7.** Pirámide de vegetación donde se muestran el promedio de los porcentajes de recubrimiento vegetal por estrato, diferenciando entre sectores quemados (color rosa) y no quemados (color verde).

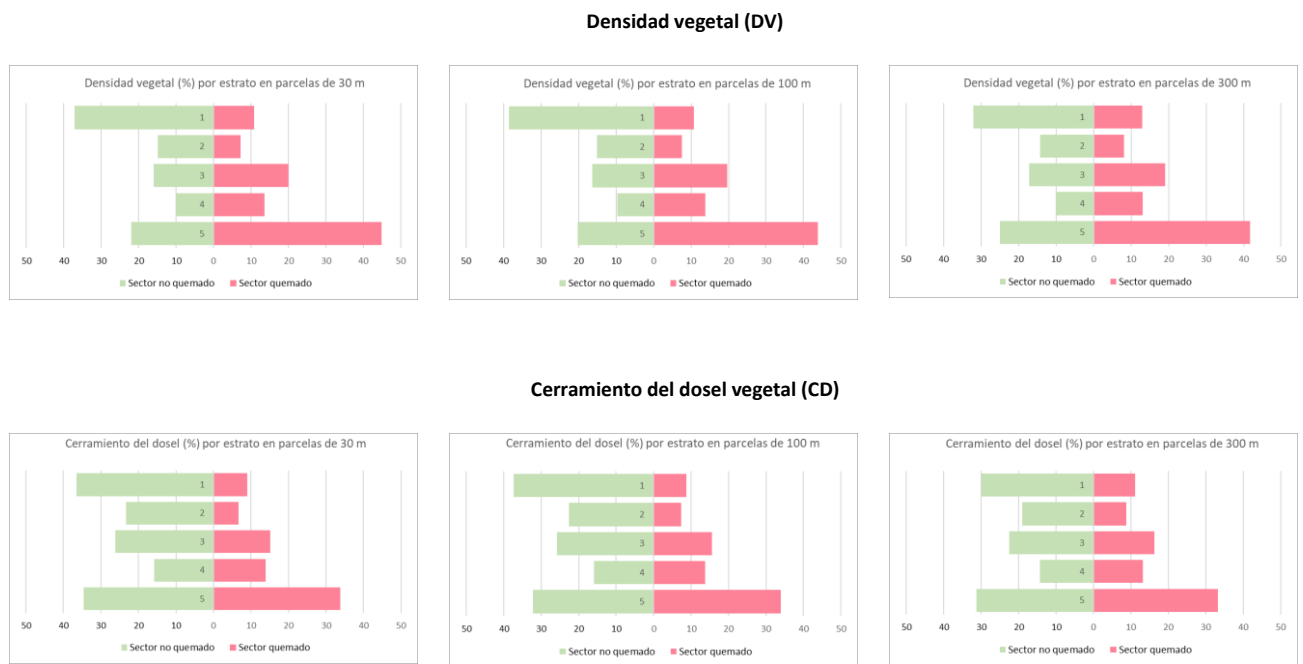
La Tabla 6 recoge los estadísticos descriptivos de la estructura de la vegetación distinguiendo entre los SQ y SC, con indicación del grado de significación de las diferencias entre sectores (test de Wilcoxon). En el E5 se encuentran porcentajes de ocupación (~56%) y niveles de variabilidad (~28%) muy similares en ambos sectores. En el E4 se registran diferencias significativas en las distribuciones de los valores ( $p$ -valor = 0,044), siendo superior el recubrimiento en los SQ (33,97%), que en los SC (25,60%). En el E3 se vuelven a encontrar promedios similares entre sectores (~40 %) ( $p$ -valor = 0,965), mientras que en los estratos superiores E1 y E2, se observan las diferencias más acusadas entre sectores, identificándose distribuciones estadísticamente diferentes ( $p$ -valor = 0,001).

**Tabla 6.** Estadísticos descriptivos del grado de recubrimiento vegetal en campo (%) por estratos (E) y sectores (quemados y control) y significación del test de Wilcoxon (N=33).

Estrato	Áreas test	Min	Max	Rango	Media	Desv. estándar	p-valor: test de Wilcoxon
1	Quemado	0,00	75,00	75,00	3,11	12,56	0,01
	Control	0,00	95,00	95,00	54,20	29,12	
2	Quemado	0,00	95,00	95,00	9,94	19,88	0,03
	Control	0,00	70,00	70,00	16,87	15,94	
3	Quemado	0,00	90,00	90,00	40,77	28,82	0,97
	Control	3,00	85,00	82,00	40,26	24,42	
4	Quemado	5,00	90,00	85,00	33,97	21,65	0,04
	Control	3,00	70,00	67,00	25,60	16,45	
5	Quemado	0,00	100,00	100,00	56,69	30,11	0,95
	Control	6,00	96,00	90,00	56,23	28,11	



Como se puede apreciar en la Figura 8, el comportamiento de los datos es semejante en los tres tamaños de parcelas (30, 100 y 300 m), en los cuales resalta el alto grado de dominancia del estrato herbáceo (> 30%) frente al resto, especialmente en los SQ. Los valores de densidad vegetal representan un análisis porcentual de un estrato frente a otro, por lo que se entiende que la vegetación herbácea del sector quemado presente un mayor porcentaje de recubrimiento frente a los demás, por el tipo de regeneración vegetal que posee, caso contrario que para los sectores de control el mayor porcentaje de densidad lo tiene la vegetación arbórea. Los valores de cerramiento del dosel vegetal, calculados con los primeros retornos de cada estrato, presentan valores menores en comparación a la densidad vegetal, teniendo así un valor del 36,46% para la vegetación arbórea, 26,10% en la vegetación arbustiva y llegando alrededor del 34,65% en la vegetación herbácea en los sectores de control. En el caso de los sectores quemados los valores de porcentajes van en aumento, teniendo un 9,07% para la vegetación arbórea, un 15,09% en vegetación arbustiva y 33,86% en vegetación herbácea, confirmando la predominancia del estrato 5 en el sector quemado. Dado que no se observan diferencias relevantes entre las pirámides de vegetación, se ha decidido aplicar el test de Wilcoxon a los valores de las métricas obtenidas a 30 m de resolución espacial.



**Figura 9.** Pirámides de vegetación donde se muestran los valores de Densidad Vegetal y Cerramiento del Dosel por estrato, diferenciando entre sectores quemados (color rojo) y no quemados (color verde).

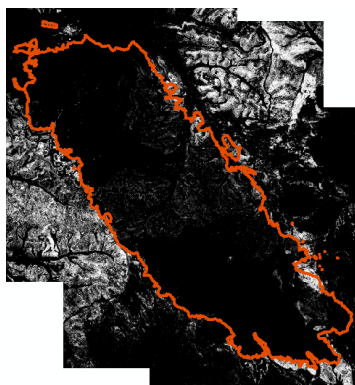
Por otro lado, al comparar los valores entre SQ y SC, en las parcelas de 30 m, la disminución en los porcentajes de densidad vegetal es evidente, por ejemplo, en el estrato 1 correspondiente a la vegetación la arbórea para el sector de control se tiene un 37,13 % de cobertura, mientras que en el sector quemado disminuye a un 10,81 %, para el estrato 2 el valor de SC es de 14,86% frente a un 7,19% del SQ, la diferencia entre sectores es cada vez más pequeña a medida que la altura de la vegetación disminuye. De tal modo que, para el estrato 5 el valor de cobertura del sector de control se encuentra por debajo del valor del sector quemado, teniendo un 22,01% frente a un 44,88%, de igual modo este comportamiento se repite en el estrato 4 teniendo un 9,98% en sector de control y un 13,65% en el sector quemado.

En la Figura 9 se muestran a modo de ejemplo, las coberturas de DV para el incendio de Zuera de 2008 para cada uno de los estratos. Para la vegetación arbórea, el área del incendio presenta valores muy bajos respecto al sector de control, al igual que el estrato 2. Sin embargo, en el estrato 5 se puede considerar la presencia de la vegetación tanto en el sector quemado como en el sector de control. De esta manera, se puede realizar una comparación de manera visual de todos los incendios analizados, claro está, que cada uno de ellos se comporta de manera diferente respecto al periodo de recuperación que ha tenido desde el suceso hasta la toma de datos.

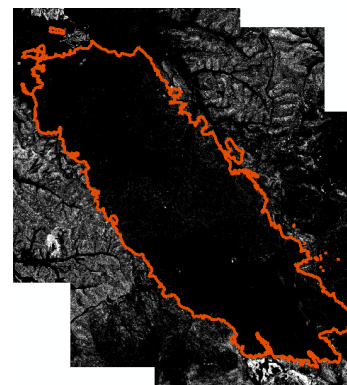
Ortofotografía del incendio de Zuera (2008)



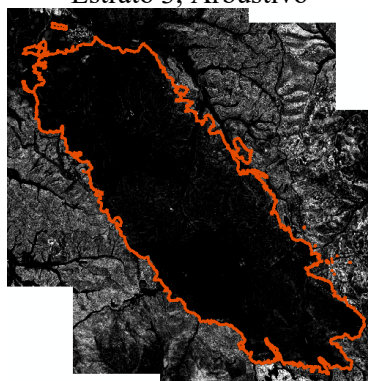
Estrato 1, Arbóreo



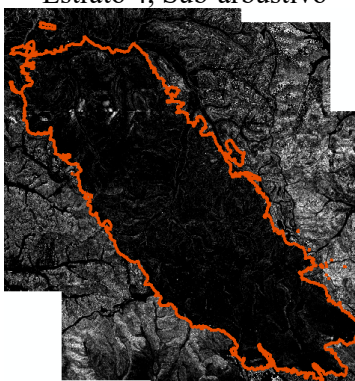
Estrato 2, Arborescente



Estrato 3, Arbustivo



Estrato 4, Sub-arbustivo



Estrato 5, Herbáceo

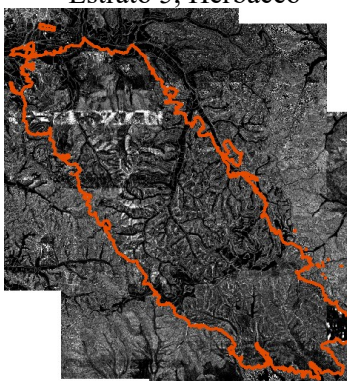


Figura 9. Estratos de DV, Zuera 2008

En la Tabla 7 se muestran los valores obtenidos del análisis del test de Wilcoxon y los estadísticos descriptivos para la densidad vegetal. Para los estratos 1, 2 y 5, se registran diferencias significativas en las distribuciones de los datos ( $p\text{-values} < 0,05$ ), los valores obtenidos en el estrato 1 reflejan una superioridad del sector de control (37,14%) frente al sector quemado (10,82%), al igual que estrato 2. En el estrato 3 los valores de porcentaje de la media y su desviación estándar no difieren en gran cantidad (4,05%), por lo tanto, no existe diferencia significativa entre los SC y SQ al igual que el estrato 4. En el estrato 5 se recupera las diferencias estadísticas entre SC (22,01%) y SQ (44,88%) regresando a una diferencia significativa evidente ( $p\text{-values} < 0,01$ ).

**Tabla 7.** Estadísticos descriptivos de la métrica de densidad vegetal (%) por estratos (E) y sectores (quemados y control) y significación del test de Wilcoxon (N=33).

Estrato	Áreas test	Min	Max	Rango	Media	Desv. estándar	p-valor: test de Wilcoxon
1	Quemado	0,00	75,86	75,86	10,82	17,07	0,00
	Control	0,00	79,99	79,99	37,14	23,88	
2	Quemado	0,00	25,59	25,59	7,19	7,85	0,00
	Control	0,24	44,05	43,81	14,86	10,78	
3	Quemado	0,00	64,11	64,11	20,06	16,59	0,33
	Control	1,11	40,72	39,61	16,01	8,46	
4	Quemado	0,00	34,38	34,38	13,65	9,51	0,11
	Control	0,38	37,26	36,88	9,98	8,35	
5	Quemado	0,00	99,87	99,87	44,88	27,45	0,01
	Control	2,23	81,38	79,14	22,01	19,69	

En el caso del CD, las diferencias son significativas en todos los estratos (Tabla 8). En el E1 y E2 se registran diferencias significativas en las distribuciones de los valores ( $p\text{-valor} = 0$ ), siendo superior el recubrimiento en los SC (36,47%), que en los SQ (9,07%). En el E3 se vuelven a encontrar promedios distintos entre sectores ( $p\text{-valor} = 0,03$ ). Finalmente, para los E4 y E5, se distinguen las diferencias entre sectores, identificándose distribuciones estadísticamente diferentes ( $p\text{-valor} > 0.1$ ).

**Tabla 8.** Estadísticos descriptivos de la métrica de cerramiento del dosel (%) por estratos (E) y sectores (quemados y control) y significación del test de Wilcoxon (N=33).

Estrato	Áreas test	Min	Max	Rango	Media	Desv. estándar	p-valor: test de Wilcoxon
1	Quemado	0,00	56,98	56,98	9,07	15,35	0,00
	Control	0,00	94,37	94,37	36,47	26,39	
2	Quemado	0,00	35,93	35,93	6,67	9,96	0,00
	Control	0,07	62,20	62,13	23,29	16,80	
3	Quemado	0,00	77,08	77,08	15,09	17,57	0,03
	Control	1,47	70,64	69,17	26,11	16,57	
4	Quemado	0,03	58,70	58,68	13,85	16,11	0,01
	Control	0,29	62,24	61,92	15,81	14,01	
5	Quemado	3,55	89,22	85,66	33,86	24,15	0,00
	Control	3,43	87,58	84,15	34,66	24,27	

Las características fisionómicas de la vegetación que coloniza las superficies afectadas por el fuego pueden presentar importantes diferencias respecto a su situación previa. La eficacia de las estrategias anatomo-fisiológicas de las especies principales, el grado de intensidad/severidad y el periodo de tiempo transcurrido tras la perturbación, son algunos de los factores que pueden controlar el grado de similitud entre situaciones pre- y post-fuego. Es conveniente reseñar que, otro tipo de factores, en este caso de carácter coyuntural, tales como el régimen pluvio-térmico posterior al fuego, y la distribución de los niveles de severidad del fuego, también afectan a la regeneración a medio y largo plazo y no son incluidos en este análisis. Además, hay que tener en consideración que, aunque todos los sectores son de pinares, cada área contiene características específicas en función de su historial de usos y perturbaciones. Esta circunstancia, por ejemplo, explica la gran variabilidad que presentan los sectores control en cada uno de los estratos de vegetación.

### 3.3. Composiciones de color

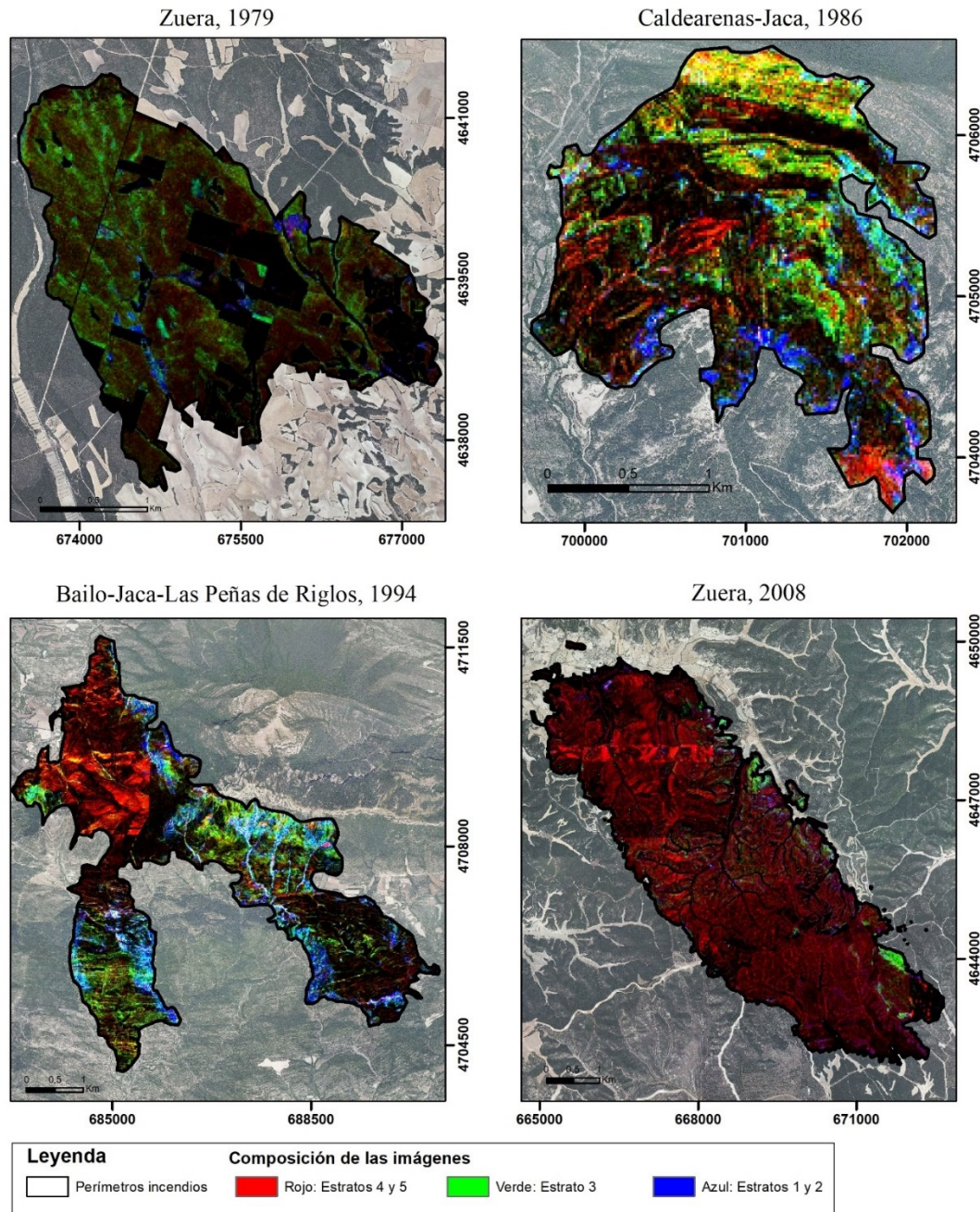
La Figura 10 recoge cuatro ejemplos de incendios ocurridos entre 1979 y 2008 en distintos tipos de pinar, en los que se muestran los resultados de las composiciones en falso color utilizando la información sobre el cerramiento del dosel vegetal por estratos.

En el incendio de Zuera del año 2008, el más próximo en el tiempo, son dominantes los tonos rojizos con diferente grado de saturación (i.e., pureza del color que, en este caso, se relaciona con el grado de coexistencia de los estratos) y luminosidad (i.e., grado de recubrimiento) que delatan la presencia dominante de los estratos inferiores (herbáceo y subarbusivo,  $\geq 1$  m;  $\approx 50\%$  de recubrimiento, medido en campo), dominados básicamente por *Quercus coccifera* y *Brachypodium retusum*. Sin embargo, mientras que en campo se ha observado la presencia de un estrato arbustivo que ocupa en torno al 40%, los datos LiDAR no recogen esta información. Cabe destacar, que en el límite oriental se reconocen pequeñas manchas de tonos azulados poco luminosos, que se corresponden con superficies donde los estratos superiores son los dominantes, aunque estos cubren escasamente la superficie.

En el sector septentrional del incendio de San Juan de la Peña de 1994, se aprecia un patrón cromático caracterizado por tonalidades mayoritariamente granates intercaladas con un moteado negro. Todo ello revela el dominio de estructuras de escasa talla combinadas con zonas sin vegetación, coincidiendo con una superficie que se repobló después del fuego. Desde el punto de vista taxonómico, los estratos

inferiores están dominados por herbáceas perennes (especies de los géneros *Brachypodium* y *Festuca*), hemicriptófitos como *Aphyllanthes monspeliensis*; y caméfitos y nanofanerófitos tales como *Buxus sempervirens*, *Genista scorpius* y *Echinopartum horridum*. A los anteriores taxones hay que añadir los pies de pequeño tamaño correspondientes a la especie utilizada en la repoblación, *Pinus sylvestris*. Mientras, el estrato arbustivo aparece dominado principalmente por fanerófitos pertenecientes a las rosáceas (*Rubus ulmifolius*, *Rosa canina*, *Rosa arvensis*). Sin embargo, en la parte sur del incendio aparecen sectores amarillentos y turquesas que se asocian a estructuras más desarrolladas en altura dominadas por *Pinus sylvestris* y *Quercus gr. cerrioides*.

### Cerramiento del dosel vegetal por estratos



**Figura 8.** Composiciones de color de los incendios de Zuera (1979), Caldearenas-Jaca (1986), Bailo-Jaca-Las Peñas de Riglos (1994) y Zuera (2008).

En el incendio de Caldearenas-Jaca de 1986, se encuentra una organización del color en varios sectores claramente diferenciados. Destacan especialmente los tonos turquesa luminosos y blanquecinos que representan el gran desarrollo de la vegetación localizada en la zona sureste del incendio. Junto a estas zonas, aparecen otras dominadas por estratos inferiores con escaso recubrimiento, que se extiende

a modo de bandas de color granate asociadas a las umbrías morfo-topográficas. Los tonos amarillos y naranjas dominantes en el sector septentrional del incendio se asocian a estructuras complejas dominadas por la combinación de vegetación subarborescente y arborescente.

Finalmente, en el incendio de Zuera de 1979, sorprende el escaso recubrimiento y la baja talla de las formaciones vegetales colonizadoras, a pesar de la gran cantidad de tiempo transcurrido ( $\approx 40$  años), como así lo pone de manifiesto el dominio de las tonalidades granates, indicadoras del dominio de los estratos  $< 1$  m y su baja luminosidad (valores de recubrimiento promedio medidos en campo  $< 50\%$ ). Las especies vegetales dominantes de esta talla son *Rosmarinus officinalis* y *Brachypodium retusum*. Al mismo tiempo son muy significativas, la distribución de grandes manchas cuadrangulares de color negro, correspondientes a zonas de cultivo, incluidas dentro de la superficie quemada. También es significativa la presencia de manchas alargadas de color verde, ajustándose a la red de barrancos de la zona, que evidencian la existencia de un estrato arbustivo denso dominado por *Juniperus oxycedrus*, *Rosmarinus officinalis* y, especialmente, *Quercus coccifera* ( $> 20\%$ ). Intercaladas entre estas últimas manchas, también se reconocen otras de color azul ( $> 3$  m) protagonizadas por *Pinus halepensis*.

### 3.4. Cartografía de las formaciones vegetales que colonizan los incendios

Los coeficientes de correlación de Spearman más bajos se producen entre las métricas *canopy cover* y *canopy relief ratio* con un valor de 0,12 y de igual manera se tiene entre *canopy relief ratio* y el percentil 99 (Tabla 9). Por lo tanto, estas métricas son las que se han empleado para realizar la clasificación digital, teniendo como puntos *training* los datos de campo junto con la clasificación categórica obtenida del análisis clúster de los datos de campo.

**Tabla 8.** Coeficientes de correlación de Spearman de las métricas LiDAR.

	Altura media	Canopy Cover	Canopy relief ratio	Desviación estándar	P99
Altura media	1	0,65	0,36	0,97	0,86
Canopy Cover		1	0,12	0,65	0,55
Canopy relief ratio			1	0,19	0,13
Desviación estándar				1	0,91
P99					1

En el proceso de post clasificación, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10, donde se evidencian los errores de comisión y omisión en cada una de las categorías de clasificación. La precisión general alcanzada es del 76,47% y un coeficiente Kappa de 0,699.

**Tabla 9.** Matriz de confusión.

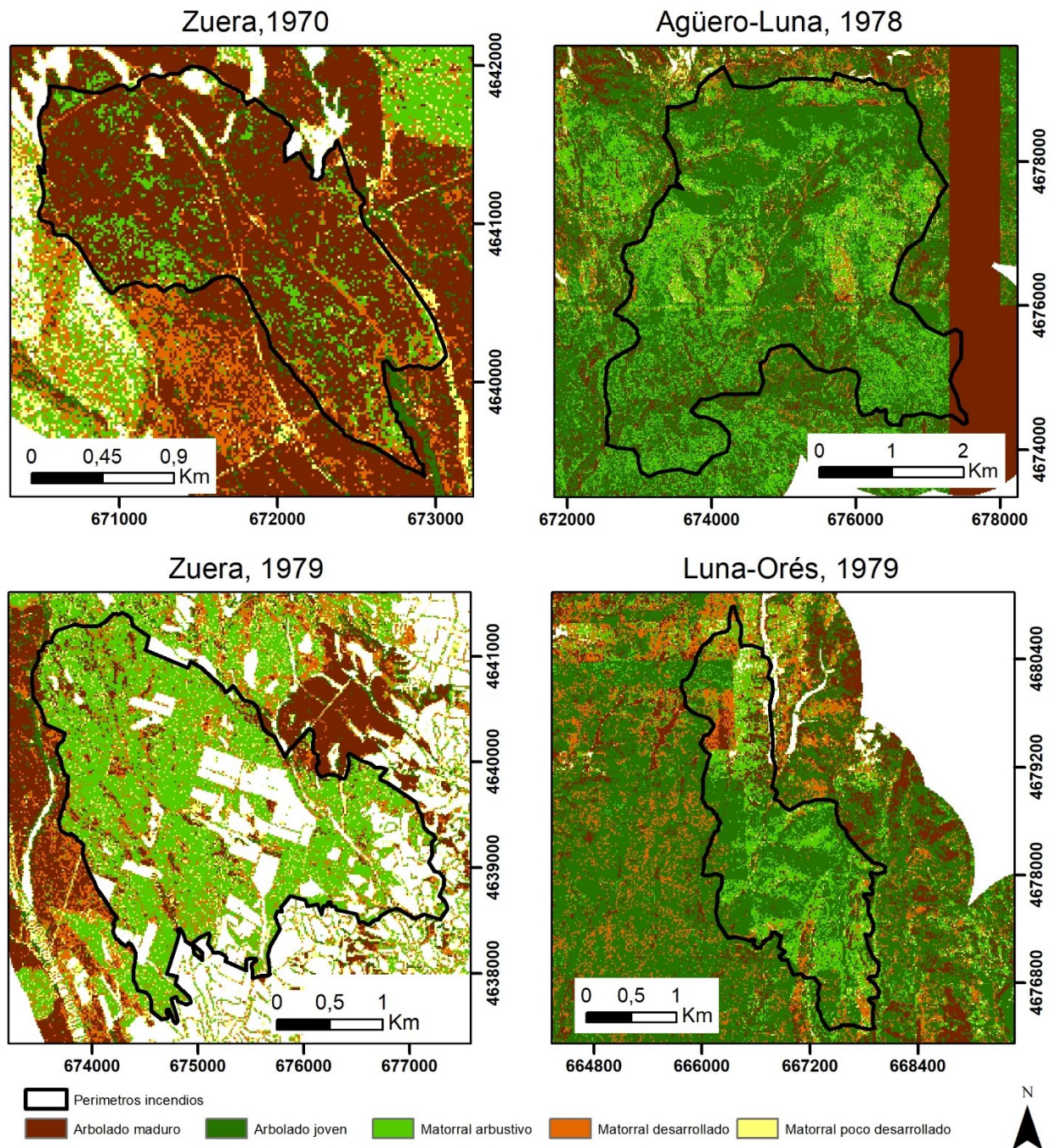
Categoría	Arbolado joven	Arbolado maduro	Matorral arbustivo	Matorral desarrollado	Matorral poco desarrollado
Arbolado joven	<b>20</b>	2	0	4	0
Arbolado maduro	3	<b>18</b>	0	0	0
Matorral arbustivo	1	0	<b>10</b>	0	8
Matorral desarrollado	1	0	0	<b>6</b>	1
Matorral poco desarrollado	0	0	0	0	<b>11</b>
Total	25	20	10	10	20

La baja densidad de puntos de los datos LiDAR, junto a la limitada información de campo para el entrenamiento de datos, da como resultado valores de omisión y comisión en cada una de las categorías de clasificación. En este sentido, para la categoría de arbolado joven se tiene un total de 25 puntos de muestreo, de los cuales 20 corresponden a la clasificación digital, sin embargo, existen 5 puntos en omisión que se distribuyen en la categoría de arbolado maduro y matorrales, de igual manera se presenta una comisión de 6 puntos en su mayoría de matorral desarrollado. Para el arbolado maduro la clasificación obtenida es muy aceptable, únicamente el 10% de los datos caen en el error de omisión catalogándolos como arbolado maduro.

El matorral arbustivo no tiene errores de omisión, pues todos los píxeles test corresponden a los valores clasificados, en cambio, el error de comisión es alto, 9 píxeles más, estos píxeles que el clasificador considera que pertenecen en su mayoría a matorral poco desarrollado representan un 47.37% de error en la categorización.

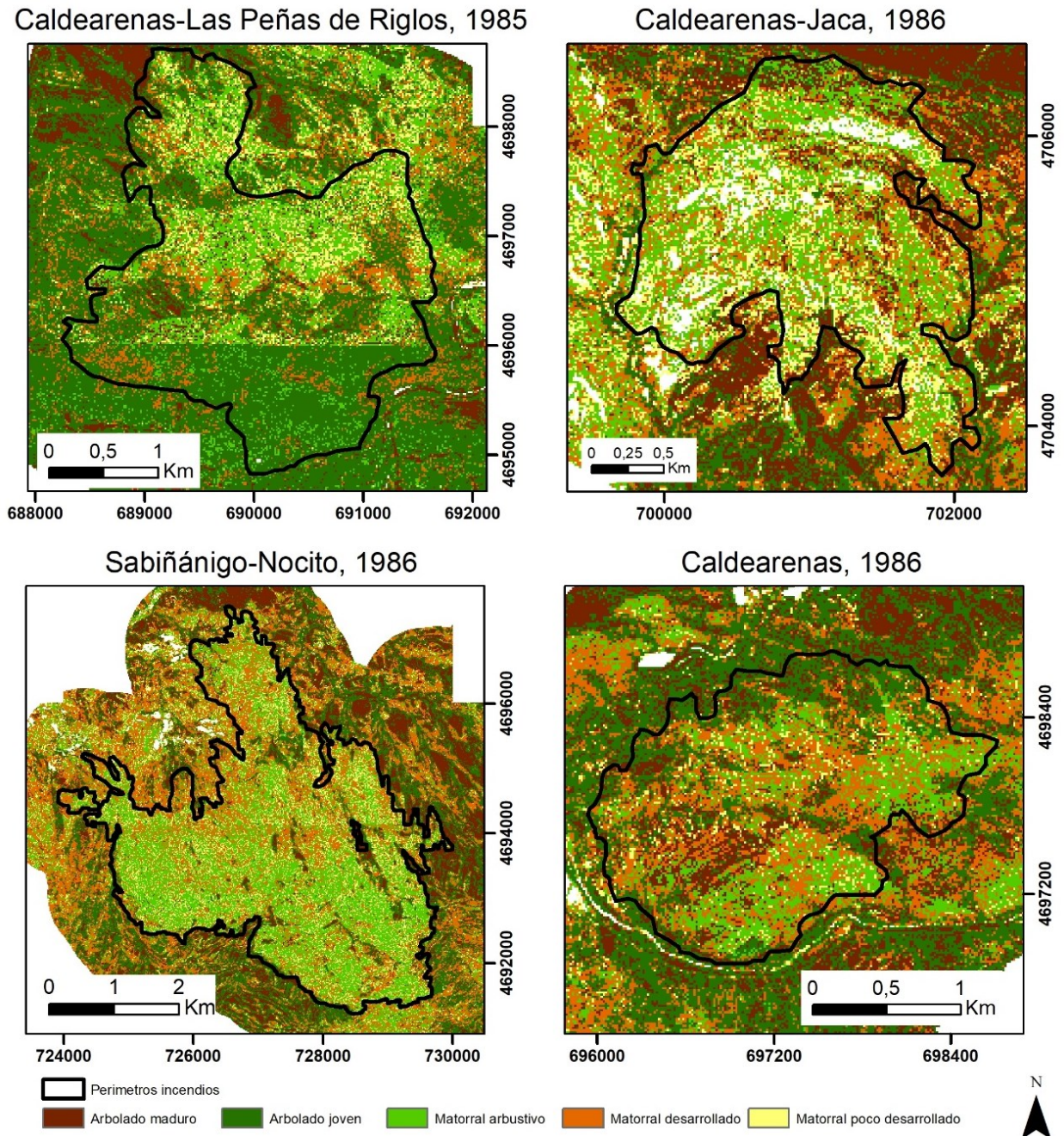
Respecto a las categorías de matorral, desarrollado y poco desarrollado, los errores de omisión son altos, 40% y 45% respectivamente, mientras que el error de comisión es bajo. La confusión entre estas dos categorías es casi nula, por lo tanto, los valores de omisión son mejorables con el aumento de puntos de testeo. La diferencia entre estas dos categorías está bien definida en el proceso de entrenamiento.

Sin embargo, al tratarse de un modelo inicial de clasificación digital de información LiDAR, los resultados obtenidos son aceptables. La cartografía se generó por décadas, las cuales se presentan a continuación.



**Figura 9.** Clasificación de los incendios ocurridos entre 1970-1980.

En la cartografía que se presenta a modo de ejemplo en las Figuras 11, 12, 13 y 14, se evidencia que la evolución de este tipo de incendios es relevante por el número de hectáreas que afectan, los impactos que generan, así como por su elevada contribución a las superficies nacionales anualmente recorridas por el fuego. Sin embargo, cada incendio produce impactos muy diferentes en función del tamaño, la intensidad, el momento de ocurrencia o el tipo de superficie forestal afectada, entre otros aspectos. Para los incendios ocurridos en la década de los 70 del siglo XX, las categorías dominantes son las que tienen una altura superior a 1 m, como es el caso del incendio de Zuera de 1970, que tiene una vegetación mayoritariamente de arbolado maduro, debido al tiempo que ha tenido para la recuperación. Sin embargo, en los tres incendios restantes el matorral arbustivo y el arbolado joven evidencia una superficie significativa en cada uno de ellos.



**Figura 10.** Clasificación de los incendios ocurridos entre 1980-1990.

En los incendios ocurridos en la década de 1980-1990, la categoría que ocupa mayor superficie es el matorral arbustivo, presentando mayor superficie de matorral desarrollado y escasas áreas de arbolado joven. En el incendio de Calderas 1986, que afectó a más de 2000 ha de pinos y monte bajo, se observan grandes zonas de arbolado maduro y arbolado joven, dando a entender una recuperación más rápida

frente a los incendios de su década. Es evidente que las cubiertas de vegetación herbácea, de matorral poco desarrollado y matorral desarrollado, afectadas por incendios, se recuperan con rapidez. Pero, es necesario por tanto esperar un tiempo prudencial que permita predecir con seguridad la evolución, de forma que las actuaciones a realizar aseguren al máximo su viabilidad y sean acordes con la regeneración existente.

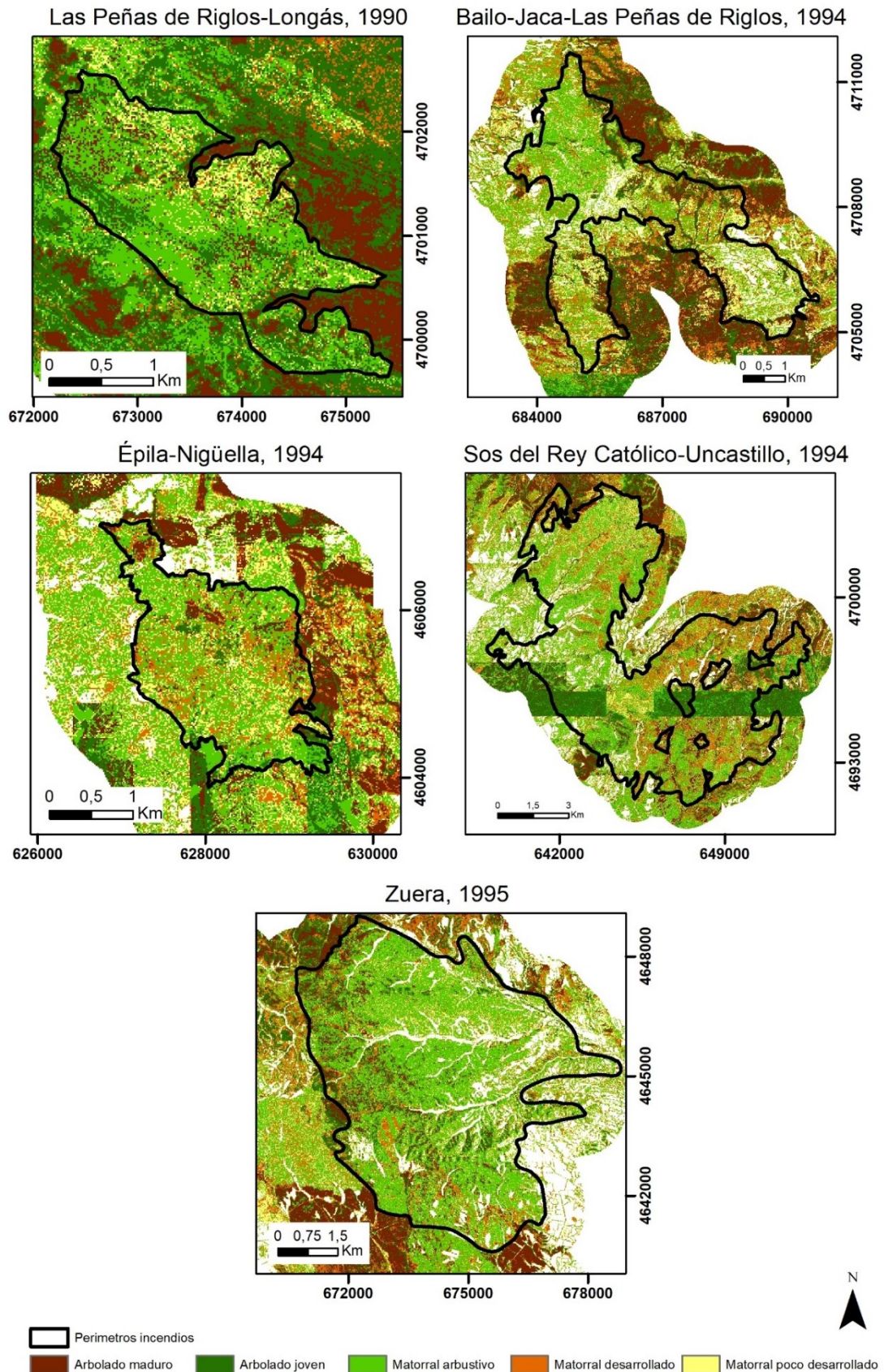
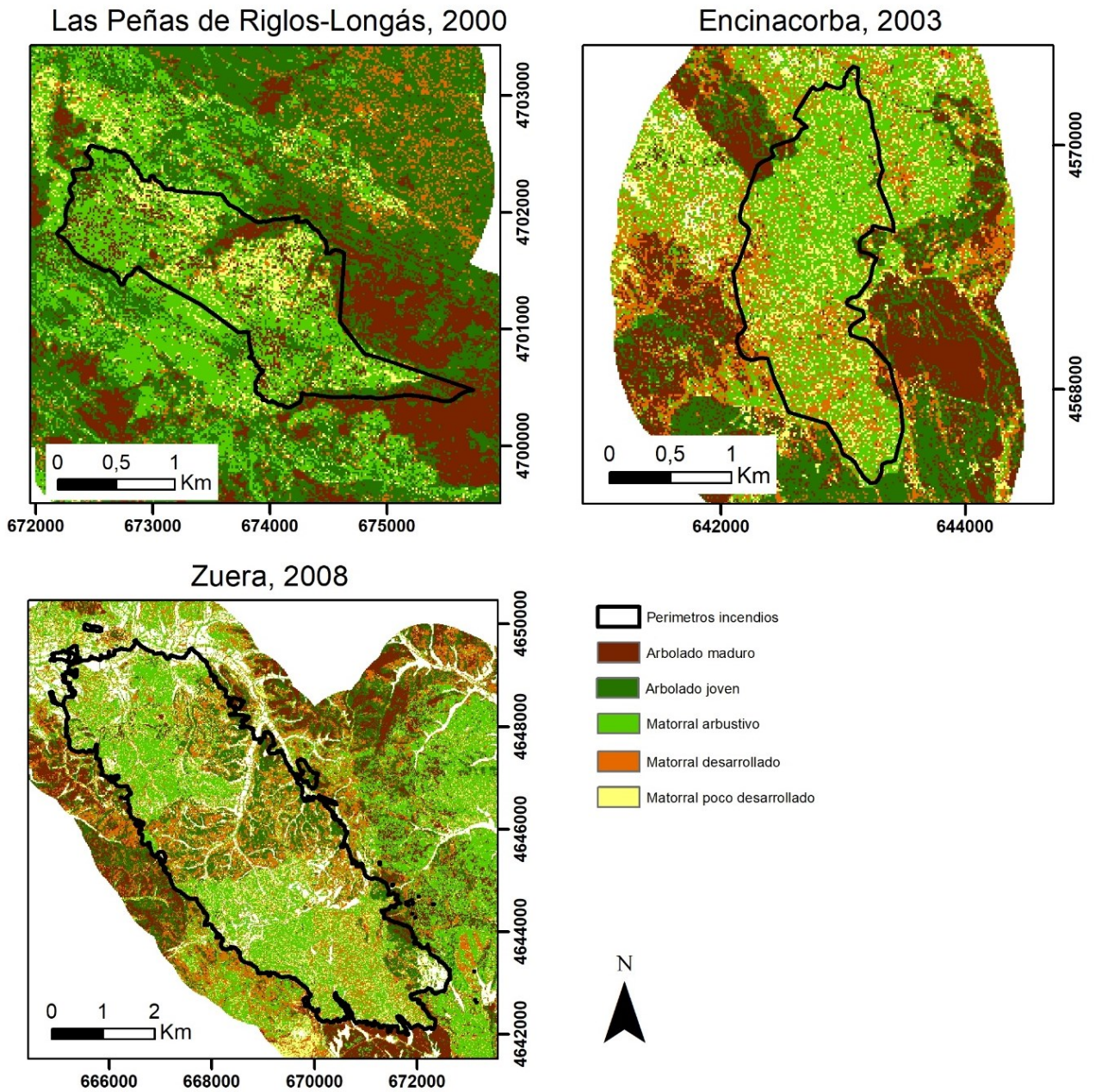


Figura 11. Clasificación de los incendios ocurridos entre 1990-2000.



En los incendios de la década de 1990, el matorral arbustivo cubre la mayor parte de las superficies, permitiendo distinguir claramente entre las zonas quemadas y las zonas de control, en las que se encuentra vegetación de porte superior a 3m. Se observa que en algunas zonas de control la vegetación predominante es el arbolado maduro o el arbolado joven.

Para los incendios ocurridos en la última década de análisis 2000-2010 se observan áreas significativas de matorral poco desarrollado, debido al reducido tiempo de recuperación en relación con la fecha de captura de los datos LiDAR-PNOA. En el incendio de Zuera de 2008, que se originó bajo condiciones meteorológicas muy favorables para la ignición y la propagación, alcanzando más de 3 000 ha, al ser el más reciente presenta una vegetación inferior a 1 m con una regeneración vegetal alta en matorrales y escasas zonas de arbolado.



**Figura 12.** Clasificación de los incendios ocurridos entre 2000-2010.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente estudio constituye una aproximación metodológica inicial al análisis de la recuperación de los paisajes afectados por el fuego desde un punto de vista estructural, haciendo uso de datos de campo y datos de teledetección LiDAR. Los resultados obtenidos muestran cierta correspondencia entre el recubrimiento vegetal observado en cinco estratos de vegetación y las métricas LiDAR de densidad y cerramiento vegetal.

El test de Wilcoxon ha evidenciado que no se dan diferencias significativas entre sectores quemados y no quemados del estrato herbáceo y arbustivo en los datos de campo. En el caso de la métrica de densidad vegetal, no se aprecian diferencias significativas en los estratos arbustivo y subarbustivo, mientras que con la métrica de cerramiento del dosel todas las diferencias son significativas. Todo esto parece indicar que los estratos inferiores son más resilientes en comparación con los estratos superiores (1 y 2), los cuales necesitan más tiempo para recuperarse. De hecho, se ha observado que las comunidades vegetales que surgen tras el fuego presentan menor recubrimiento medio por estrato, quedando muy poco desarrollados los estratos superiores frente a los estratos inferiores. También hay que tener en cuenta que las nubes de puntos LiDAR utilizadas son de baja densidad, lo que puede afectar a la capacidad para distinguir los estratos inferiores, sobre todo en situaciones en las que están presentes todos los estratos y se produce un continuo vertical de vegetación, desde el dosel arbóreo hasta el herbáceo. En este sentido, convendrá profundizar más en el uso de nuevas métricas de diversidad estructural y en la posibilidad de agrupar los estratos para tener una estructura más simple a la hora de ser caracterizada por las métricas LiDAR. Asimismo, las composiciones de color generadas con las capas ráster de cerramiento del dosel vegetal por estrato, constituyen una innovación útil para visualizar las zonas quemadas en sus diferentes estadios de regeneración, dependiendo, entre otros factores, de la fecha de ocurrencia del fuego.

En la caracterización de los incendios, el test Kruskal-Wallis muestra diferencias significativas entre las métricas analizadas por décadas. De esta manera, se reafirma lo antes mencionado, el tiempo de recuperación en cada incendio marca un factor importante al momento de su caracterización, ya que los valores más altos se tienen en las primeras décadas de estudio. Respecto a la clasificación digital, es indiscutible la influencia del tiempo en la recuperación de los incendios, así, los incendios de la década de los 70 presentan predominancia de las comunidades de arbolado maduro y joven, mientras que los incendios de la última década permiten apreciar diferentes matices en su categorización. Claramente se distinguen las zonas de incendios, de control, de pronta recuperación (reforestación) y en los límites de los incendios se aprecia el contraste entre la vegetación matorral y el arbolado maduro.

Finalmente, es importante mencionar que existen zonas en las cartografías que presenta problemas debido a las características de los datos LiDAR, factores como la baja densidad de puntos, la altura de vuelo, el ángulo de escaneo, el número de retornos registrados, el solape y demás características técnicas del vuelo del proyecto PNOA-LiDAR, junto a las características topográficas del área de estudio. Al tratarse de una propuesta inicial de metodología de trabajo es importante mencionar que los resultados claramente pueden mejorar al trabajar con una nube de puntos más densa, además que incluir un mayor número de variables temáticas podrían proporcionar un mejor análisis de los incendios. Para la clasificación digital, la obtención de mayor información de campo puede ser crucial para mejorar los resultados obtenidos, de igual manera se recomienda trabajar con información de origen óptico, como son los índices de vegetación.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la financiación del Proyecto de Investigación “Dynamic analysis of the Resilience of Fire-Affected Forest Landscapes (PaF) using multisensor spectral indicators” (Referencia Administrativa: PID2020-118886RB-I00), del Programa Estatal de Generación de Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+i y del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad, perteneciente al Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Angeler, D. G., & Allen, C. R. (2016). Quantifying resilience. *Journal of Applied Ecology*, 53(3), 617-624.
- Bertrand, G. (1966). Por une étude géographique de la végétation. . *Revue Géographique Des Pyrénées Et Du Sud-Oest*, 38, 129-144.
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira-Sandoval, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, (48), 55-66.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J., García, M., Yebra, M., Oliva, P. (2020). Satellite Remote Sensing Contributions to Wildland Fire Science and Management. *Curr. For. Reports*, 6, 81–96. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00116-5>
- Chuvieco, E., Giglio, L., & Justice, C. (2008). Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global change biology*, 14(7), 1488-1502.
- Galindo, G., Espejo, O. J., Rubiano, J. C., Vergara, L. K., & Cabrera, E. (2014). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. *V2. 0. IDEAM, Bogota*.
- García, M., North, P., Viana-Soto, A., Stavros, N.E., Rosette, J., Martín, M.P., Franquesa, M., González-Cascón, R., Riaño, D., Becerra, J., Zhao, K. (2020). Evaluating the potential of LiDAR data for fire damage assessment: A radiative transfer model approach. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111893 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111893>
- Gayo, A. P. (2019). Obtención de variables forestales mediante LiDAR para el cálculo de riesgo de incendios en el principado de Asturias. Universidad de Oviedo, Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio. Recuperado a partir de: <http://hdl.handle.net/10651/53595>
- Gelabert, P.J., Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., Domingo, D. (2020). Forest structural diversity characterization in Mediterranean landscapes affected by fires using Airborne Laser Scanning data. *GIScience Remote Sens.*, 57, 497–509. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1738060>
- Gordon, C.E., Price, O.F., Tasker, E.M. (2017). Mapping and exploring variation in postfire vegetation recovery following mixed severity wildfire using airborne LiDAR. *Ecol. Appl.*, 27, 1618–1632. <https://doi.org/10.1002/eap.1555>
- Jennings, S. B., Brown, N. D., & Sheil, D. (1999). Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 72(1), 59-74.
- Jiménez-Ruano, A., Pérez-Cabello, F., Montorio Llovería, R. (2016). Niveles de LAI/fPAR en superficies afectadas por incendios forestales en Aragón. Análisis mediante el producto MCD15A2 de MODIS. *Pirineos*, 171, e019. <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2016.171003>

- Lázaro, M. Á. (2010). Reconstrucción histórica y tipificación de los incendios forestales en el prepirineo central y occidental de Aragón. Universidad de Lérida, Ingeniería Técnica Forestal. Recuperado a partir de: <http://hdl.handle.net/10459.1/45894>
- Martín-Alcón, S., Coll, L., De Cáceres, M., Guitart, L., Cabré, M., Just, A., González-Olabarría, J.R. (2015). Combining aerial LiDAR and multispectral imagery to assess postfire regeneration types in a Mediterranean forest. *Can. J. For. Res.*, 45, 856–866. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0430>
- McGaughey, R.J. (2022). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. United States, Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station.
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., Tanase, M.A., De la Riva, J. (2014). Forest fire severity assessment using ALS data in a mediterranean environment. *Remote Sensing*, 6, 4240–4265. <https://doi.org/10.3390/rs6054240>
- Pérez-Cabello, F., Montorio, R., Alves, D.B. (2021). Remote Sensing Techniques to assess Post-Fire Vegetation Recovery. *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.*, 21, 100251. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100251>
- Rico, E. C., & Maseda, R. C. (2008). El abandono de tierras: concepto teórico y consecuencias. *Revista Galega de Economía*, 17(2), 0.
- Roussel, J.R., Auty, D., Coops, N.C., Tompalski, P., Goodbody, T.R.H., Sánchez Meador, A., Bourdon, J.F., de Boissieu, F., Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, 251, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>
- Salamanca Céspedes, J. E., & Pérez Castillo, J. N. (2008). LiDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano. *Ingeniería*, 13, 147-161.
- Sánchez, M. (2017). Estudio de la regeneración natural del incendio de la sierra del Almirez (Lorca) y redacción de medidas de restauración ecológica. Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado a partir de: <http://hdl.handle.net/10317/6708>
- Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Francos, M., & Farguell, J. Grandes incendios forestales en España y alteraciones de su régimen en las últimas décadas. *Geografía, Riesgos y Protección Civil*, 2, 67-79.
- Vales, J. J., Pino, I., Granado, L., Prieto, R., Méndez, E., Rodríguez, M., Giménez de Azcárate, F., Ortega, E. & Moreira, J. M. (2020). Cartografía de la afección y recuperación vegetal del incendio de Las Peñuelas en Moguer (Huelva) con imágenes satelitales. Año 2017. *Revista de Teledetección*, (57), 79-94.
- Viana-Soto, A., García, M., Aguado, I., Salas, J. (2022). Assessing post-fire forest structure recovery by combining LiDAR data and Landsat time series in Mediterranean pine forests. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 108, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102754>

## ANEXO

**Tabla 10.** Valores de las métricas LiDAR obtenidos para cada uno de los incendios de la zona de estudio, donde  $\bar{x}$  es el promedio y  $\sigma$  es la desviación típica.

Nº	Año	Incendio (denominación según el municipio)	Percentil 99 (m)		Altura media (m)		Desviación típica (m)		Canopy Cover (%)		Canopy relief ratio	
			$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
1	1967	La Sotonera, Anies	4,48	2,22	2,35	1,17	0,93	0,59	99,57	1,62	0,38	0,10
2	1970	Zuera, La Torre del Español	4,21	1,59	2,30	1,09	1,02	0,49	74,18	17,98	0,50	0,12
3	1973	Caldearenas	4,59	2,52	1,73	1,32	1,27	0,75	53,72	21,12	0,31	0,11
4	1973	Arguis, La Sotonera	4,05	2,18	2,02	1,01	0,90	0,70	99,10	4,07	0,39	0,11
5	1975	Bailo, Las Peñas de Riglos, Longás	5,54	3,90	2,20	2,07	1,49	1,23	75,43	23,17	0,30	0,14
6	1975	Las Peñas de Riglos, Rasal	6,57	2,35	3,26	1,08	1,35	0,81	99,80	1,22	0,34	0,11
7	1975	Los Fayos, Tarazona	8,26	4,37	3,81	2,74	2,44	1,51	69,52	24,80	0,39	0,16
8	1975	Tobed	8,82	3,18	3,96	2,26	2,56	1,04	63,23	19,19	0,40	0,14
9	1977	Nueno	4,73	3,26	1,67	1,60	1,29	0,99	43,49	22,72	0,30	0,11
10	1978	Loporzano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1978	Loporzano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1978	Agüero, Luna	10,04	60,91	6,90	58,11	1,51	10,57	90,23	13,27	0,33	0,13
13	1978	Purujosa	4,17	5,31	1,53	2,61	1,17	1,54	36,95	26,85	0,29	0,13
14	1978	Épila	1,14	1,34	0,39	0,47	0,29	0,42	27,19	17,87	0,28	0,10
15	1979	Luna, Orés	4,84	2,69	1,97	1,26	1,23	0,82	80,77	22,28	0,34	0,11
16	1979	Zuera	2,74	1,61	1,15	0,96	0,75	0,48	29,63	20,58	0,36	0,10
17	1979	Nonaspe	2,30	2,29	0,72	0,72	0,58	0,66	47,92	21,64	0,28	0,09
18	1979	Fayón	1,55	1,40	0,49	0,42	0,39	0,44	32,94	18,52	0,28	0,10
19	1980	Ardisa, Luna, Murillo de Gállego	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,14	73,37	21,02	0,33	0,12
20	1980	Igriés, Nueno	5,65	3,76	3,17	2,55	1,44	1,00	41,85	28,29	0,47	0,14
21	1980	Las Peñas de Riglos	6,07	2,52	1,98	1,02	1,73	0,86	84,58	9,52	0,29	0,09
22	1980	Las Peñas de Riglos	3,96	2,36	1,85	1,01	0,78	0,66	98,79	4,33	0,33	0,11
23	1980	Boltaña, Sabiñánigo, Aineto	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	15,32	50,76	32,01	0,30	0,13
24	1980	Sos del Rey Católico	1,94	1,77	0,64	0,75	0,49	0,53	30,68	18,08	0,27	0,11
25	1980	Gotor, Illueca	7,23	2,94	2,90	1,83	2,08	1,00	71,80	18,78	0,34	0,14
26	1980	Nueno	3,70	4,42	1,64	1,68	0,88	1,40	64,87	31,55	0,33	0,13
27	1980	Bubierca, Castejón de las Armas	7,77	66,49	5,73	60,77	1,50	17,15	36,49	20,71	0,28	0,13
28	1980	Casbas de Huesca, Panzano	3,74	4,57	1,32	1,83	0,98	1,32	46,17	19,25	0,31	0,09
29	1980	Castiliscar	1,27	0,81	0,44	0,26	0,30	0,22	44,71	24,79	0,29	0,09
30	1981	Jaca	3,77	3,24	1,62	1,61	1,03	0,91	18,24	21,69	0,39	0,12
31	1981	Agüero, Luna, Murillo de Gállego	0,00	0,00	0,00	0,00	2,62	15,38	82,61	22,57	0,42	0,11
32	1981	Caldearenas, Nueno	4,30	2,56	1,42	1,19	1,13	0,77	48,71	18,45	0,28	0,10
33	1981	Loarre	2,88	2,31	1,86	1,56	0,37	0,44	67,75	33,60	0,34	0,12
34	1981	Loporzano	1,43	1,55	0,65	0,74	0,44	0,56	2,40	5,93	0,41	0,12
35	1981	Ateca, Bubierca	2,69	2,71	1,06	1,39	0,79	0,88	30,51	20,58	0,30	0,14
36	1981	Borja, Bulbente, Tarazona	1,96	3,32	0,65	0,93	0,52	1,16	35,87	14,90	0,30	0,09
37	1982	Ateca, Bubierca, Moros	0,00	0,00	0,00	0,00	2,86	16,81	49,89	25,71	0,42	0,18
38	1982	Salcedillo, Segura de Baños	4,91	2,49	1,84	1,34	1,35	0,79	49,06	17,11	0,33	0,12
39	1982	Sabiñánigo, Laguarda	4,43	8,71	2,02	7,98	0,95	0,94	38,28	21,56	0,26	0,11

Nº	Año	Incendio (denominación según el municipio)	Percentil 99 (m)		Altura media (m)		Desviación típica (m)		Canopy Cover (%)		Canopy relief ra- tio	
			$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
40	1982	Villarluengo, Montoro de Mezquita	2,29	2,18	0,60	0,57	0,56	0,63	50,58	27,31	0,24	0,11
41	1983	Asin, Biota, Luesia	2,18	1,93	1,12	1,10	0,58	0,53	13,36	18,11	0,44	0,10
42	1983	Sabiñánigo, Güe	5,14	2,32	2,58	1,51	1,30	0,62	39,71	26,52	0,44	0,11
43	1983	Bailo, Las Peñas de Riglos	0,00	0,00	0,00	0,00	2,31	1,43	80,64	13,45	0,26	0,12
44	1983	Ainzón, Tabuena	2,32	2,03	0,76	0,89	0,62	0,65	38,73	19,49	0,26	0,11
45	1983	Berge	3,89	2,84	1,36	1,19	1,06	0,85	43,00	19,35	0,31	0,10
46	1983	Aliaga, Boca del Infierno	5,77	4,90	2,03	2,35	1,69	1,59	48,81	22,80	0,29	0,13
47	1983	Rubiales, Zaragoza	4,27	2,94	1,43	1,46	1,28	1,03	35,00	15,94	0,28	0,13
48	1984	Calatayud, El Frasno, Paracuellos de la Ribera	3,55	25,80	1,67	24,79	0,92	4,56	36,53	19,72	0,29	0,13
49	1984	El Grado, Hoz y Costean, Naval	5,75	3,10	2,15	1,58	1,63	1,00	60,70	17,60	0,32	0,11
50	1984	Sos del Rey Católico	1,40	1,25	0,39	0,26	0,31	0,33	36,18	12,92	0,27	0,11
51	1984	Calatayud, Sediles	6,77	2,78	3,33	2,00	1,85	0,85	60,44	19,48	0,45	0,14
52	1984	Nueno, Santolarieta	5,01	1,80	2,99	0,71	0,92	0,55	99,32	3,66	0,43	0,11
53	1984	Allueva	5,21	2,44	2,04	1,32	1,38	0,70	61,60	17,08	0,35	0,10
54	1985	Caldearenas, Las Peñas de Riglos	6,09	3,44	2,15	1,70	1,67	1,20	79,19	15,42	0,26	0,12
55	1985	Jaca	5,25	3,24	1,71	1,56	1,45	1,10	85,84	12,10	0,25	0,13
56	1985	Anzánigo, Caldearenas	7,34	3,00	3,43	1,53	1,63	1,07	78,79	26,56	0,29	0,12
57	1985	Castellote	2,59	2,19	0,81	0,82	0,70	0,67	37,00	18,55	0,27	0,11
58	1986	Agüero, Las Peñas de Riglos, Murillo de Gállego	5,54	3,40	2,73	1,72	1,08	0,96	98,71	4,15	0,33	0,11
59	1986	Caldearenas, Javierrelatre	6,46	2,95	2,74	1,70	1,90	0,98	59,92	19,09	0,37	0,12
60	1986	Las Peñas de Riglos	5,76	2,21	3,33	0,87	0,82	0,63	98,38	7,43	0,32	0,11
61	1986	Caldearenas, Jaca	3,74	2,31	1,77	1,32	1,01	0,64	32,34	24,75	0,41	0,11
62	1986	Sabiñánigo, Nocito	3,48	4,44	1,20	3,44	0,98	1,03	38,58	18,25	0,26	0,11
63	1986	Zuera	3,82	2,44	1,56	1,11	1,05	0,80	62,35	20,67	0,36	0,11
64	1986	Arguis, Nueno	2,43	2,24	0,88	1,04	0,57	0,66	39,60	22,88	0,26	0,10
65	1986	Capella, Benabarre, Graus	3,94	1,72	1,58	0,85	1,02	0,49	56,56	18,10	0,37	0,11
66	1986	Alcorisa, Foz-Calanda	1,91	1,42	0,63	0,60	0,50	0,44	36,70	17,53	0,28	0,10
67	1986	Calanda, Ginebrosa/Calanda	3,45	2,42	1,08	0,99	0,92	0,96	45,00	16,84	0,25	0,11
68	1987	Luna	4,43	3,03	1,55	1,34	1,22	1,03	78,35	18,65	0,31	0,11
69	1987	Calcena, Talamantes	1,96	1,99	0,64	0,82	0,53	0,62	31,98	19,87	0,26	0,12
70	1987	Fuentes de Jiloca, Montón	6,06	2,55	2,67	1,54	1,75	0,85	58,37	19,26	0,41	0,15
71	1988	Labuerda, Puértolas	6,37	3,22	2,60	1,86	1,83	1,04	63,65	20,79	0,35	0,13
72	1989	Undués de Lerda	4,91	2,05	1,67	0,96	1,24	0,63	66,15	13,43	0,29	0,10
73	1989	Ateca, Buberca, Moros	4,07	2,87	1,84	1,65	1,15	0,88	44,77	24,47	0,37	0,15
74	1989	Lagueruela	0,89	1,48	0,36	0,59	0,24	0,47	8,10	11,23	0,36	0,12
75	1990	Graus, Peralta de Calasanz	2,81	1,39	1,20	0,72	0,76	0,41	44,46	17,57	0,37	0,11
76	1990	Las Peñas de Riglos, Longás	5,48	4,15	1,81	2,05	1,53	1,39	86,08	9,45	0,24	0,13
77	1991	Antillón, Pertusa	1,76	2,16	0,70	0,96	0,50	0,69	50,72	40,57	0,37	0,14
78	1991	Ayerbe, Biscarrués	2,02	1,97	0,80	0,64	0,46	0,61	74,55	31,46	0,33	0,12
79	1991	Fanlo, Puértolas	5,23	4,04	1,83	1,91	1,45	1,30	57,67	20,84	0,28	0,11
80	1991	Fraga	0,96	0,81	0,35	0,27	0,22	0,24	30,81	18,27	0,26	0,08
81	1991	Graus, Santa Liestra y San Quilez	4,39	3,34	1,58	1,51	1,15	0,94	54,24	20,62	0,29	0,11
82	1991	El Grado, Hoz y Costean	3,46	2,36	1,28	1,05	0,97	0,73	44,26	21,40	0,32	0,11

Nº	Año	Incendio (denominación según el municipio)	Percentil 99 (m)		Altura media (m)		Desviación típica (m)		Canopy Cover (%)		Canopy relief ratio	
			$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
83	1991	Huesca, Nueno, Loporzano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	0,45	71,07	40,13	0,42	0,11
84	1991	Huesca, Apies	1,19	1,75	0,51	1,00	0,32	0,55	13,30	20,77	0,35	0,11
85	1991	Añón de Moncayo, Ambel, Talamantes	1,95	1,55	0,72	0,71	0,51	0,46	39,69	21,03	0,30	0,11
86	1991	Balconchán, Orcajo, Used	2,26	1,60	0,80	0,78	0,54	0,45	58,61	21,05	0,27	0,10
87	1991	Añón de Moncayo, Ambel, Talamantes	1,67	1,53	0,61	0,68	0,43	0,46	36,30	18,42	0,30	0,10
88	1991	Los Olmos	2,06	2,40	0,68	1,00	0,57	0,82	31,04	16,44	0,28	0,11
89	1991	Seira, Barbaruens, Chía, Castejón de Sos, Bisaurri	7,96	6,77	2,72	3,16	2,19	2,04	59,64	22,34	0,28	0,11
90	1991	Ayerbe, Biscarrués	2,99	2,90	1,06	1,21	0,84	0,92	24,65	25,42	0,33	0,12
91	1991	La Torre del Español, San Gregorio	2,88	2,58	0,90	0,86	0,74	0,79	55,94	18,26	0,28	0,08
92	1993	Azara, Peraltilla, Pozán del Vero	2,43	1,45	0,85	0,63	0,68	0,47	39,24	19,89	0,29	0,11
93	1993	Torrente de Cinca	1,55	1,65	0,58	0,72	0,41	0,56	31,81	17,11	0,30	0,09
94	1993	Abejuela	2,52	2,48	0,85	0,97	0,66	0,76	46,91	25,59	0,29	0,10
95	1993	Calcena, Purujosa, Talamantes	2,51	3,10	0,87	1,31	0,68	0,96	37,64	22,05	0,28	0,12
96	1994	La Sotonera	3,90	0,82	2,40	0,64	0,94	0,43	99,64	1,10	0,48	0,07
97	1994	Adahuesca, Ainsa Sobrarbe	1,34	2,25	0,52	1,08	0,36	0,69	26,30	15,32	0,28	0,09
98	1994	Sos del Rey Católico, Uncastillo	10,02	66,86	8,04	66,93	0,85	0,81	45,99	29,58	0,33	0,13
99	1994	Murillo de Gállego	4,76	3,85	2,69	1,42	0,72	1,10	99,44	3,88	0,35	0,11
100	1994	Bailo, Jaca, Las Peñas de Riglos	4,37	3,64	2,10	2,09	1,16	1,00	28,12	26,32	0,40	0,13
101	1994	Fraga	1,51	1,48	0,51	0,51	0,37	0,46	42,92	21,98	0,28	0,09
102	1994	Calatayud, Torralba de Ribota	4,36	2,95	2,04	1,77	1,22	0,89	54,68	22,27	0,38	0,15
103	1994	Tabuenca, Trasobares	1,40	1,33	0,49	0,60	0,35	0,39	31,83	16,81	0,27	0,10
104	1994	Añón de Moncayo	1,33	1,30	0,47	0,37	0,27	0,35	56,12	36,97	0,28	0,13
105	1994	Tabuenca, Tierga	1,65	1,22	0,62	0,59	0,41	0,35	33,27	14,97	0,29	0,11
106	1994	Épila, Nigüella	2,71	2,04	0,95	0,92	0,74	0,66	40,89	21,95	0,29	0,13
107	1994	Tramacastiel, Rubiales	2,01	3,00	0,61	1,09	0,55	1,03	41,17	21,46	0,24	0,11
108	1994	Villarluengo	2,80	4,52	0,90	1,56	0,73	1,42	46,89	24,33	0,28	0,11
109	1994	Uncastillo, Petilla de Aragón	5,41	3,88	2,19	2,01	1,49	1,22	55,73	23,28	0,34	0,13
110	1994	Luna, Orés	2,55	2,09	0,99	0,62	0,58	0,64	80,26	34,38	0,36	0,13
111	1994	Pradilla de Ebro, Tauste, Torres de Berrellén	0,41	0,03	0,18	0,01	0,07	0,01	33,64	3,25	0,26	0,02
112	1994	Ayerbe, Biscarrués	2,60	1,67	1,01	0,40	0,53	0,47	97,64	4,82	0,33	0,12
113	1994	Nonaspe	2,44	2,52	0,83	0,96	0,66	0,82	46,56	21,45	0,30	0,10
114	1995	Zuera	2,45	2,46	0,96	1,16	0,66	0,81	35,47	24,28	0,33	0,11
115	1998	Gargallo	0,68	0,82	0,26	0,30	0,17	0,28	14,41	11,73	0,30	0,12
116	1999	Manzanera	6,02	4,24	1,85	1,78	1,77	1,43	50,23	20,47	0,26	0,12
117	2000	Las Peñas de Riglos, Longás	6,09	5,64	2,36	2,80	1,81	1,91	80,42	13,92	0,28	0,14
118	2000	Sabiñánigo, Secorún	4,22	3,09	1,35	1,23	1,12	0,93	45,88	20,49	0,25	0,09
119	2000	Luesia	3,35	2,66	1,50	1,17	0,79	0,75	53,83	29,06	0,38	0,14
120	2000	Castel de Cabra, Barranco del Infierno	0,60	0,70	0,24	0,18	0,13	0,21	22,11	13,67	0,31	0,10
121	2000	Sarrión	1,86	2,86	0,71	1,38	0,51	0,89	22,53	16,49	0,28	0,12
122	2001	Santa Cruz de Grío, Tobed	3,74	3,07	1,26	1,36	1,13	1,09	40,94	16,63	0,28	0,11
123	2001	Las Peñas de Riglos, Loarre, Murillo de Gállego	6,03	5,24	3,08	2,40	1,27	1,61	84,39	30,23	0,36	0,13

Nº	Año	Incendio (denominación según el municipio)	Percentil 99 (m)		Altura media (m)		Desviación típica (m)		Canopy Cover (%)		Canopy relief ratio	
			$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
124	2001	Ariza	1,06	1,59	0,40	0,65	0,28	0,54	25,08	20,93	0,32	0,12
125	2001	Jaca, Bernues	5,20	3,68	2,03	1,82	1,60	1,26	30,83	25,31	0,35	0,15
126	2002	Uncastillo	4,44	2,87	1,65	1,50	1,22	0,86	44,44	21,37	0,30	0,13
127	2003	Ayerbe, Biscarrués, Erés	2,47	2,18	1,15	0,45	0,46	0,61	99,44	2,12	0,38	0,12
128	2003	Loporzano	2,29	2,87	1,03	1,50	0,64	0,87	10,40	17,85	0,39	0,13
129	2003	Encinacorba	2,24	2,44	0,85	1,28	0,63	0,78	28,20	16,55	0,28	0,12
130	2003	Mequinenza	1,44	1,72	0,55	0,71	0,36	0,53	33,17	19,97	0,31	0,12
131	2004	Abanto	1,23	1,58	0,63	0,84	0,35	0,49	11,92	12,95	0,41	0,13
132	2004	Zaragoza, San Gregorio	0,97	1,48	0,35	0,52	0,25	0,46	16,00	17,04	0,32	0,12
133	2004	Aguaviva	4,13	3,88	1,19	1,38	1,07	1,16	43,45	19,87	0,23	0,09
134	2005	Luna	2,10	2,54	0,81	1,06	0,50	0,85	76,69	31,36	0,33	0,13
135	2005	Nuévalos	2,25	3,01	0,79	1,30	0,61	0,96	35,74	19,93	0,29	0,12
136	2005	Cañizar del Olivar, La Cañi- zara	0,00	0,00	12,03	0,00	0,17	0,42	21,86	15,78	0,31	0,11
137	2006	Ibica	3,38	2,42	1,58	1,38	0,98	0,76	15,87	22,03	0,41	0,14
138	2006	Peralta de Calasanz	2,68	2,56	0,93	1,17	0,72	0,79	32,22	19,80	0,29	0,12
139	2006	Sos del Rey Católico, Sofuentes	1,91	1,94	0,63	0,75	0,47	0,55	33,36	32,00	0,29	0,13
140	2006	Allueva, Fonfria, Torrecilla del Rebollar	2,06	1,26	1,37	0,96	0,29	0,31	56,79	41,18	0,39	0,13
141	2006	Castiliscar	2,72	0,00	1,46	0,00	0,90	0,00	68,51	0,00	0,46	0,00
142	2006	Castiliscar, Uncastillo	2,00	1,14	0,84	0,60	0,59	0,39	12,46	17,50	0,84	0,60
143	2006	Baélls, Benabarre	0,00	0,00	1,63	0,00	2,21	0,00	14,54	14,54	0,18	0,00
144	2007	Huesca	0,86	1,55	0,42	0,75	0,24	0,50	3,60	10,63	0,39	0,12
145	2007	Torre de las Arcas	1,46	2,99	0,52	1,27	0,37	0,89	31,59	18,77	0,32	0,11
146	2007	Torre de las Arcas	1,10	2,06	0,40	0,81	0,27	0,60	31,04	18,27	0,40	0,81
147	2007	Huesca	1,67	1,81	0,82	0,95	0,47	0,56	14,94	19,14	0,42	0,13
148	2008	Zuera	3,01	3,60	0,94	1,41	0,90	1,23	24,00	17,81	0,29	0,13
149	2008	Zuera	5,37	0,75	2,17	0,50	1,61	0,38	48,41	11,33	0,39	0,08
150	2009	Mequinenza	3,06	2,94	0,91	1,12	0,88	1,00	32,61	23,65	0,30	0,15
151	2009	Morés	1,39	2,41	0,51	1,10	0,36	0,78	33,03	23,20	0,32	0,14
152	2009	Jaulín	2,01	2,88	0,74	1,28	0,60	0,99	24,56	19,47	0,32	0,13
153	2009	Terrer	2,37	3,48	0,79	1,40	0,69	1,18	36,52	22,52	0,32	0,13
154	2009	Zaragoza, San Gregorio	1,93	2,46	0,55	0,86	0,54	0,81	19,49	19,46	0,30	0,13
155	2009	Valdeltormo	6,45	3,61	2,30	1,76	1,99	1,25	42,61	21,16	0,33	0,14
156	2009	Aliaga	3,24	5,74	1,08	4,53	0,95	1,39	29,79	21,40	0,30	0,14
157	2009	Alloza	2,51	3,33	0,96	1,66	0,72	1,09	30,00	24,08	0,32	0,14
158	2009	Corbalán	2,88	3,73	1,22	2,14	0,80	1,11	29,09	26,49	0,33	0,15
159	2009	Los Olmos	4,14	4,29	1,57	2,19	1,27	1,48	29,23	22,58	0,33	0,16
160	2009	Jaulín	0,87	0,95	0,29	0,27	0,22	0,30	22,08	17,58	0,29	0,27
161	2009	Terrer	0,89	0,90	0,32	0,28	0,21	0,25	33,83	20,58	0,32	0,28
162	2009	Morés	0,63	0,09	0,28	0,02	0,13	0,02	53,28	3,28	0,32	0,04
163	2009	Mequinenza	5,92	2,96	2,49	1,89	1,83	1,19	34,42	3,91	0,32	0,17
164	2009	Zaragoza	1,06	1,50	0,58	0,89	0,29	0,47	36,65	18,20	0,39	0,09
165	2009	Aliaga	7,24	0,00	3,07	0,00	2,44	0,00	61,98	0,00	0,41	0,00
166	2009	Corbalán	5,10	0,00	0,88	0,00	1,19	0,00	32,29	0,00	0,15	0,00
167	2009	Los Olmos	0,98	1,04	0,34	0,36	0,25	0,33	23,76	19,56	0,34	0,36



N°	Año	Incendio (denominación según el municipio)	Percentil 99 (m)		Altura media (m)		Desviación típica (m)		Canopy Cover (%)		Canopy relief ra- tio	
			$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
168	2009	Valdeltormo	2,02	1,06	0,61	0,40	0,28	0,13	36,67	22,14	0,23	0,00
169	2009	Alloza	1,05	0,99	0,36	0,34	0,26	0,30	26,88	22,57	0,36	0,34
170	2010	Sos del Rey Católico	5,44	3,76	2,53	1,95	1,49	1,26	48,33	29,25	0,39	0,18
171	2010	Alcalá de Gurrea	0,46	0,55	0,22	0,19	0,10	0,17	8,99	13,53	0,38	0,10
172	2010	Alcalá de Gurrea	0,44	0,47	0,22	0,15	0,10	0,14	8,97	13,50	0,22	0,15
173	2010	Gurrea de Gállego	1,56	2,18	0,76	1,06	0,41	0,67	3,37	9,82	0,41	0,14
174	2010	Sos del Rey Católico	7,14	0,00	4,54	0,00	1,45	0,00	98,99	0,00	0,59	0,00

Nota: los valores de media y desviación estándar presentados en la tabla corresponden a los ciento setenta y cuatro incendios caracterizados con las métricas LiDAR con sus respectivas unidades.