

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**TIPOLOGÍA DE INCENDIOS EN FUNCIÓN DE SU
RESPUESTA VEGETAL: ANÁLISIS MEDIANTE ÍNDI-
CES ESPECTRALES Y DATOS DE CAMPO**

Autor: Jonathan Goya Hernández

Director: Fernando Pérez Cabello

Máster Universitario en

***Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del te-
rritorio: sistemas de información geográfica y teledetección***

Junio de 2019



**Universidad
Zaragoza**

***Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio***



Resumen

El incremento del número de los incendios en el ámbito mediterráneo ha hecho que este tema se postule como uno de los principales problemas medioambientales. Para su estudio, es imprescindible conocer el comportamiento de la vegetación en su proceso de regeneración vegetal. En el siguiente trabajo se analizan de forma unitemporal 15 incendios de la comunidad de Aragón, en las provincias de Zaragoza y Huesca. Esta selección consta de incendios de diferentes tamaños, tipo de vegetación, época, año de origen, así como de diferente sustrato. Para realizar el análisis de la regeneración vegetal se han utilizado imágenes satélites a dos resoluciones espaciales 10m (R10) y 20m (R20) capturadas por Sentinel-2, de tal forma que permite averiguar el potencial del sensor MSI con un nivel de procesamiento Level2-A. Es decir, incluye la corrección atmosférica mediante el algoritmo SEN2COR. Una vez descargadas las imágenes se ha realizado un análisis estadístico mediante NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y ANOVA (ANalysis Of VAriance). Por otra parte, se han establecido agrupaciones entre los incendios atendiendo a sus diferencias y similitudes con el método de Bonferroni. Los resultados se han comparado con datos de campo para esclarecer qué tipo de vegetación regenta actualmente en las áreas quemadas. Finalmente, se ha efectuado un análisis de las agrupaciones en función de las características de los píxeles de cada uno de los incendios. A continuación, se han establecido dos tipos de agrupaciones, no jerárquicas (K-means) y jerárquicas (Clasificación Tree), permitiendo analizar los resultados obtenidos de los índices de vegetación NDVI y NBR, así como su correcto empleo. Con lo citado anteriormente, se han conseguido asociar los patrones de regeneración específicos en función de las características del fuego.

Palabras Clave: *Regeneración vegetal, muestreo, Sentinel-2, índice de vegetación, categoría, resolución.*

Abstract

The increase of the number of fires in the Mediterranean area has made this issue to be postulated as one of the main environmental problems. For its study, it is essential to know the behavior of the vegetation in its own process of plant regeneration. In the following work, 15 fires have been analyzed at the same time, on the community of Aragón, in Zaragoza and Huesca provinces. This selection consists of fires of different sizes, type of vegetation, season, year of origin, as well as different substrate. To carry out the analysis of the vegetal regeneration, satellite images have been used at two spatial resolutions 10m (R10) and 20m (R20) captured by Sentinel-2, in such a way that it allows to determinate the potential of the MSI sensor with a processing level Level2-A. That is, it includes the atmospheric correction through the SEN2COR algorithm. Once the images have been downloaded, a statistical analysis was performed through NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and ANOVA (ANalysis Of VAriance). On the other hand, groups among the fires according to their differences and similarities have been established with the Bonferroni method. The results have been compared with field data to clarify what type of vegetation currently runs at the burned areas. Finally, an analysis of the groups has been made according to the characteristics of the pixels of each of the fires. Then, two types of clusters have been established, non-hierarchical (K-means) and hierarchical (Tree Classification), allowing to analyze the results obtained from the vegetation indices NDVI and NBR, as well as their correct use. With the aforementioned, it has been possible to associate the specific regeneration patterns according to the characteristics of the fire.

Key Words: *Plant regeneration, sampling, Sentinel-2, vegetation index, category, resolution.*

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	10
3. MARCO GEOGRÁFICO EN EL QUE SE INSCRIBEN LAS ZONAS QUEMADAS	10
4. MATERIALES Y MÉTODOS	12
4.1 Selección de incendios a analizar	13
4.2 Selección, obtención y tratamiento de las imágenes	15
4.2.1 Extracción y preparación de las bases de datos	17
4.2.2 Cálculo de los Índices espectrales	18
4.3 Áreas de muestreo de campo	19
4.4 Análisis estadístico de los incendios forestales a partir de índices espectrales	20
5. RESULTADOS	23
5.1 Distribución de los valores de NDVI a 10 m de resolución (R10).....	23
5.2 Agrupación de incendios en función del nivel de regeneración (R10)	25
5.3 Distribución de los valores de NDVI a 20 m de resolución (R20).....	30
5.4 Agrupación de incendios en función del nivel de regeneración (R20)	31
5.5 Diferencias entre R10 y R20 y Tipología de Incendios.....	35
5.6 Agregaciones en función de la variación fenológica (mayo-septiembre) en los valores de NDVI y NBR.....	40
5.6.1 Análisis visual de las tendencias (mayo-septiembre) a partir de los valores de NDVI. 41	
5.6.2 Agrupación no jerárquica de las observaciones en función de la variación fenológica (mayo-septiembre) en los valores de NDVI y NBR	44
5.6.3 Agrupación jerárquica (<i>Classification tree</i>) de las observaciones en función de la variación fenológica (mayo-septiembre) en los valores de NDVI y NBR.	46
6. CONCLUSIONES	49
7. BIBLIOGRFÍA	51
ENLACES DE INTERES	53
8. ANEXO	54

Índice de tablas

Tabla 1. Selección de los incendios tratados en este trabajo	13
Tabla 2. Descripción de la topografía del incendio así como del tipo de cubierta que recubre la zona quemada	14
Tabla 3. Características principales del sensor Sentinel-2	17
Tabla 4. Imágenes descargas para las resoluciones espaciales de 10 y 20 m	60
Tabla 5. Cálculo del NDVI para nuestro estudio de caso	18
Tabla 6. Cálculo del índice NBR para nuestro estudio de caso	19
Tabla 7. Porcentaje de recubrimiento de la vegetación por especie y estrato vegetal.	22
Tabla 8. Muestra de los incendios analizados, ordenados de mayor a menor superficie quemada (Ha).....	24
Tabla 9. Estadísticos descriptivos de los valores de NDVI anual correspondiente a los muestreos M1 y M2 (R10). En rojo los valores mínimos y verde los máximos	25
Tabla 10. Resumen del análisis ANOVA para M1 y M2 en NDVI R10.....	27
Tabla 11. Agrupaciones de los incendios en NDVI R10 a través del test Bonferroni (M1)	28
Tabla 12. Agrupaciones por pares de los incendios en R10 a través del método Bonferroni para (M2).....	29
Tabla 13. Estadísticos descriptivos de los valores de NDVI anual correspondiente al muestreo M1 y M2 en R20. En rojo los valores mínimos y verde los máximos.....	30
Tabla 14. Diferencias significativas en al menos dos categorías para M1 y M2 en R20 .	31
Tabla 15. Agrupaciones por pares de los incendios en R20 a través del método Bonferroni para M1.....	33
Tabla 16. Agrupaciones por pares de los incendios en R20 a través del método Bonferroni para M2.....	34
Tabla 17. Distribución de los coeficientes de dispersión (r^2) entre los valores promedio (prom.) y desviación estándar (ds) en función de la resolución y el muestreo	36
Tabla 18. Resultados obtenidos del análisis k-means	45
Tabla 19. Matriz de confusión en porcentaje entre los píxeles de cada incendio	46
Tabla 20. Agrupación jerárquica Classification tree en función de la varianza fenológica	47
Tabla 21. Nodos principales (p -value>1) de la estructura de más de 60 elementos del árbol de clasificación identificado	48
Tabla 22. Reclasificación de las bandas para la imagen R20	60
Tabla 23. Reclasificación de las bandas para la imagen R10	61

Índice de figuras

Figura 1. Área de estudio. Localización de zonas quemadas	11
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso metodológico FASE 1 y FASE 2.....	12
Figura 3. Localización de las zonas quemadas y su altitud	15
Figura 4. Esquema de la metodología empleada para el cálculo del Test de Bonferroni.	21
Figura 5. Esquema de la metodología empleada para el cálculo de <i>K-Means</i> y <i>CHAID Algorithm</i>	21
Figura 6. Agrupaciones de los incendios en función de los valores promedios de NDVI para R10 (M1).....	28
Figura 7. Agrupaciones de los incendios en función de los valores promedios de NDVI para R10 (M2).....	29
Figura 8. Agrupaciones de los incendios en función de los valores promedios de NDVI para R20 (M1).....	34
Figura 9. Agrupaciones de los incendios en función de los valores promedios de NDVI para R20 (M2).....	35
Figura 10. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio para el Grupo 2 en el incendio N°12	37
Figura 11. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio para el Grupo 3 en los incendios N° 4 y 6	38
Figura 12. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio para el Grupo 4 en los incendios N° 1, 13 y 15.....	39
Figura 13. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio para el Grupo 5 para el incendio N°14.....	40
Figura 14. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de Zuera 2008 (11), Zuera 2006 (13) y Sos Del Rey Católico 1994 (1)	41
Figura 15. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de Nueno 1986 (7, 8, 9 y 10)	42
Figura 16. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de a Bailo 1994 (2) y Las Peñas de Riglós 1985 (4 y 6)	42
Figura 17. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de Caldearenas 1986 (3 y 5).....	43
Figura 18. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de Épila 1994 (15) y Zuera 2008 (14)	44
Figura 19. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (25/06/2006) (Nª13).....	54
Figura 20. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (23/06/2006) (Nª12), A	55
Figura 21. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (23/06/2006) (Nª12), B	55

Figura 22. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (04/05/2008) (N ^a 14), A	56
Figura 23. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (04/05/2008) (N ^a 14), B	56
Figura 24. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Épila-Niguela (28/07/1994) (N ^o 15), A.....	57
Figura 25. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Épila-Niguela (28/07/1994) (N ^o 15), B	57
Figura 26. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Sos del Rey Católico (16/07/1994) (N ^o 1)	58
Figura 27. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Las Peñas de Riglos (05/08/1985) (N ^a 4 y 6), A.....	58
Figura 28 Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Las Peñas de Riglos (05/08/1985) (N ^a 4 y 6), B.....	59

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el incremento de los incendios forestales se ha convertido en uno de los problemas medioambientales de mayor envergadura dentro del ámbito mediterráneo (Jiménez Ruano et al., 2016; Pausas, 2004). Esta situación viene determinada, en gran medida, por uno de los cambios socioeconómicos más importantes del Siglo XX: el abandono de las actividades agrarias y del uso tradicional de los recursos del monte (Piacere 1987; Paniagua 1992). Las consecuencias de esta coyuntura se materializan en un incremento constante de los combustibles forestales y en la despoblación de las zonas rurales, al tiempo que se eleva el riesgo de incendio debido a las nuevas fórmulas de explotación de los espacios naturales en clave turística (Keeley et al., 1999).

En este contexto, la gestión forestal debe prestar atención a la producción cartográfica de la superficie quemada, a la evaluación de los espacios forestales con mayor peligro de incendio y a la aplicación de tratamientos cuyo objetivo principal sea minimizar los efectos del fuego (Miller et al., 2002). Más aún, cuando se prevé que tanto el número, como la intensidad y severidad de estos sigan en aumento (Chuvieco et al., 2008). No obstante, a pesar de los numerosos efectos negativos que trae consigo un incendio, entre los que se encuentran la pérdida de suelo, la alteración de las comunidades vegetales o la degradación paisajística; los ecosistemas mediterráneos presentan estrategias de adaptación al fuego que minimizan su impacto (Mooney et al., 1986). Esto se debe a la intensa profusión de los mecanismos de rebrotación-germinación de las especies y semillas características de estas comunidades (Calvo et al., 2003). En este sentido, el proceso de sucesión que se produce tras el fuego suele describirse como un restablecimiento de las comunidades afectadas que, en la literatura científica, se reconoce como de auto-sucesión (Hanes, 1971).

En este contexto de preocupación creciente por el control de los incendios, la Teledetección espacial se erige como una de las herramientas principales en los análisis del riesgo y de las consecuencias del fuego. A pesar de las múltiples ventajas que presenta el uso de la Teledetección en aplicaciones medioambientales, no es hasta finales de los años 80 cuando España empieza a integrarse en el uso de estas fuentes de información y tecnologías (Sacristán, 2006). Con el paso de los años y teniendo en cuenta las prerrogativas de la utilización de este método en el control medioambiental, el uso de las imágenes de satélite ha experimentado un incremento exponencial, debido al carácter global, la mayor periodicidad y el mayor rango de longitudes de onda de la información obtenida.

En el ámbito de la problemática ambiental ligado a los incendios forestales, las plataformas utilizadas por antonomasia durante todos estos años han sido los satélites del programa Landsat, de la agencia espacial estadounidense (NASA). Por lo que, al haberse utilizado en numerosas investigaciones, hay una abundante literatura científica que lo abala.

En los últimos años, los nuevos satélites puestos en órbita en el marco del programa *Copernicus* de la *European Space Agency* (ESA) con el objetivo de observar la Tierra (Sentinel-2A y Sentinel-2B), proporcionan imágenes con alta resolución espacial y temporal que pueden complementar e incluso sustituir a Landsat en el estudio de incendios forestales.

Estos dos satélites (Sentinel-2A/2B) de órbita helio-sincrónica, funcionan de forma simultánea por etapas de 180° a una altitud media de 786 km. Recientemente se está operando con otros dos nuevos satélites, Sentinel-3A y Sentinel-3B, para los cuales se ha aumentado la frecuencia temporal a dos días, con el objetivo de controlar fenómenos meteorológicos, de contaminación de los océanos y degradación medioambiental de la superficie terrestre.

Aunque la historia de estos sensores es relativamente reciente y solo se dispone de imágenes tomadas por ellos desde junio de 2015, estas se han empleado en numerosos trabajos de aplicados a las diferentes vertientes del análisis de los incendios forestales (Fernández-Manso et al., 2017). Entre otros, Guerrero et al. (2017) y Delegido et al., (2018), ponen de manifiesto las mejoras que introduce Sentinel-2 respecto a Landsat en el análisis de los efectos de fuego, al aumentar tanto su resolución espacial como espectral. La combinación del ciclo orbital y la resolución espacial, y la incorporación de nuevas bandas espectrales, hacen de los Sentinel una fuente de información ideal en este ámbito de análisis. No en vano el programa *Copernicus* en el que se enmarcan, tiene como objeto realizar observaciones de la Tierra y dar servicios en el contexto de la evolución y seguimiento de la superficie forestal y la gestión de desastres naturales, entre otras numerosas aplicaciones.

El empleo de índices espectrales de vegetación, que son operaciones algebraicas que consideran los valores de reflectividad de una cubierta en sus diferentes longitudes de onda, son un recurso habitual aplicado al análisis de los incendios forestales en el contexto de las técnicas de teledetección. Su objetivo es analizar con mayor precisión la información relacionada con la vegetación, minimizando los efectos derivados del suelo o las condiciones atmosféricas (Gilabert et al., 1997). En abundantes investigaciones publicadas, se pueden encontrar múltiples ejemplos en los que se emplean estos índices para analizar el contenido de la clorofila, el contenido de agua, la dinámica fenológica, el porcentaje de cubierta verde, la estimación de biomasa o de superficie foliar (*Leaf Area Index* -LAI) y, por supuesto, las consecuencias del fuego.

El primer índice de vegetación fue el desarrollado por Pearson y Miller en 1972. Este fue el Ratio *Vegetation Index* (RVI), y se basaba en la diferencia espectral de la vegetación en las longitudes de onda del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC). En 1974, Rouse et al. (1974) propusieron el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), fundado sobre las diferencias normalizadas de las bandas teniendo un rango de -1 a +1. En 1988, Huete publicó el *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), donde introduce un nuevo parámetro (L) cuya finalidad es modelizar la influencia del suelo consiguiendo desplazar el punto de convergencia de las isolíneas de vegetación a la región negativa del plano de reflectividad. A partir de este último, han ido apareciendo otros índices, basados en él, pero introduciendo determinadas variaciones para modelar la influencia del suelo como el de *Moisture Stress Index* (MSI) creado por Rock et al., (1985), apoyado en el contenido de agua de las hojas, con el objetivo de medir el estrés hídrico de la vegetación, a través de la diferencia del infrarrojo medio (IRM) y el infrarrojo cercano (IRC). Así mismo, destacan otros índices, tales como el *Composition Burn Index* (NBR), que tiene por objetivo medir la severidad del fuego por medio de la diferencia en el (IRC) y (SWIR).

Sin embargo, el NDVI es el más utilizado en el control de la regeneración vegetal, ya que ha sido y sigue siendo la técnica más empleadas para caracterizar el funcionamiento de la regeneración vegetal post-fuego (Gitas et al., 2012), debido a la fuerte correlación con la biomasa (Gao et al., 2000) o el área foliar (Baret y Guyot, 1991).

Mediante la utilización de índices de vegetación, la mayoría de investigaciones sobre incendios forestales acometen el análisis de sus consecuencias en el corto/medio plazo, toda vez que los meses inmediatos al fuego son los más importantes en la medida que se producen las transformaciones funcionales más relevantes de los ecosistemas afectados. Sin embargo, el diagnóstico a largo plazo (< 5/10 años) de las áreas afectadas por el fuego resulta clave para interpretar la eficacia de posibles medidas correctoras de los efectos del fuego, analizar de manera global la resiliencia de los ecosistemas al fuego y conocer los cambios que se producen de cara a interpretar las transformaciones del paisaje y la pérdida de funcionalidad de los sistemas naturales. De este modo, la cantidad de tiempo que transcurre desde el incendio también puede explicar la intensidad y perdurabilidad de los efectos del mismo.

En este trabajo se ensaya una perspectiva uni-temporal con el propósito de identificar diferencias en distintas observaciones correspondientes a incendios de diferentes fechas y ambientes en el marco, especialmente, de los paisajes pre-pirenaicos aragoneses. El análisis se realiza considerando un único año, pero utilizando 5 imágenes correspondientes a 5 momentos diferentes del ciclo vegetativo de la cubierta vegetal desde primavera (mayo) hasta el inicio del otoño (septiembre).

Además, se utilizan datos de campo extraídos en diferentes campañas realizadas en el marco del proyecto de investigación GA-LC-042/2011 (Caixa-DGA), para cuantificar la magnitud de la regeneración en términos de vegetación, para comprobar la correspondencia entre la respuesta espectral (magnitud de los índices de vegetación) y variables más específicas, como la estructura o la composición florística de la vegetación colonizadora.

El objetivo del estudio es comprobar si existen patrones espectrales que se correspondan con un determinado incendio en función del año y del tipo de ecosistema afectado. Como hipótesis de partida se mantiene que existe una correspondencia entre las características de las superficies quemadas y la magnitud y variabilidad de los índices espectrales en el marco de la respuesta vegetal ante el fuego. Además, este trabajo se inscribe en el conjunto de aportaciones que tiene como objetivo analizar el potencial de las imágenes Sentinel-2 para evaluar la regeneración vegetal mediante índices espectrales como el NDVI o el NBR y, de manera más específica, los efectos de la doble resolución espacial de las imágenes del sensor MSI en función del diferente ancho de banda.

El TFM se enmarca dentro de una de las líneas de investigación del grupo de investigación GEOFOREST (Procesos GEO ambientales en espacios FORESTales -51_17R), y se ha desarrollado en el marco de las Ayudas IUCA 2017/2018 a la investigación financiada por el Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de la Universidad de Zaragoza.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de trabajo de fin de máster es analizar la regeneración vegetal mediante datos espectrales provenientes del satélite Sentinel-2 en diferentes zonas incendiadas de la parte occidental de Aragón. Sin embargo, a partir del proceso de investigación centrado únicamente en este objetivo, se han derivado otros específicos, detallados a continuación:

- Identificar agrupaciones de incendios en función de los niveles de regenerado utilizando conjuntamente datos de campo y valores de NDVI considerando la variabilidad fenológica de las zonas quemadas.
- Realizar una primera aproximación al análisis de las relaciones entre la magnitud de la regeneración en términos de NDVI y las mediciones en campo relativas a las características de la vegetación colonizadora.
- Evaluar el potencial de las imágenes del sensor MSI (Sentinel-2) para analizar los niveles de regeneración vegetal. El objetivo se centra especialmente en mostrar el impacto de la diferente resolución espacial y espectral de las imágenes proporcionadas con un nivel de procesamiento Level 2A (incluye la corrección atmosférica mediante el algoritmo SEN2COR).

3. MARCO GEOGRÁFICO EN EL QUE SE INSCRIBEN LAS ZONAS QUEMADAS

Los incendios que se van a estudiar se localizan en la depresión del Ebro y las estribaciones meridionales del Pirineo occidental. La Depresión del Ebro es una amplia fosa tectónica limitada al Norte por los Pirineos, al Sur por la Cordillera Ibérica y al Este por la Cordillera Catalana (Peña et al., 2004). En ella se emplaza de forma longitudinal el río Ebro caracterizándose por ser el más caudaloso de España. Los incendios forestales estudiados en esta investigación se localizan en las comarcas de Alto Gállego; Hoya de Huesca; La Jacetania; Cinco Villas; D.C Zaragoza.

Estos incendios presentan una distribución en dirección NE-SO emplazados en las Sierras occidentales del Prepirineo oscense y zaragozano. El tipo de vegetación que cubre la mayor parte de estos incendios es muy heterogéneo, al igual que las condiciones climáticas y topográficas (Jiménez Rueno et al., 2016). Se trata de formaciones de *Pinus halepensis*; *Pinus nigra*; *Pinus sylvestris*; *Quercus ilex*; *Buxus sempervirens*; *Genistas scorpius* (Pérez-Cabello, 2002; Ruiz de la Torre, 1990a).

Entre estas comarcas hay diferencias en cuanto a la superficie quemada siendo las comarcas de Cinco Villas y D.C Zaragoza las que tienen mayor extensión. Así mismo, las de menor superficie quemada destacan por haberse visto afectadas por un mayor número de incendios, distribuidos de forma dispersa. Estas comarcas son; La Jacetania; Alto Gállego y la Hoya de Huesca.

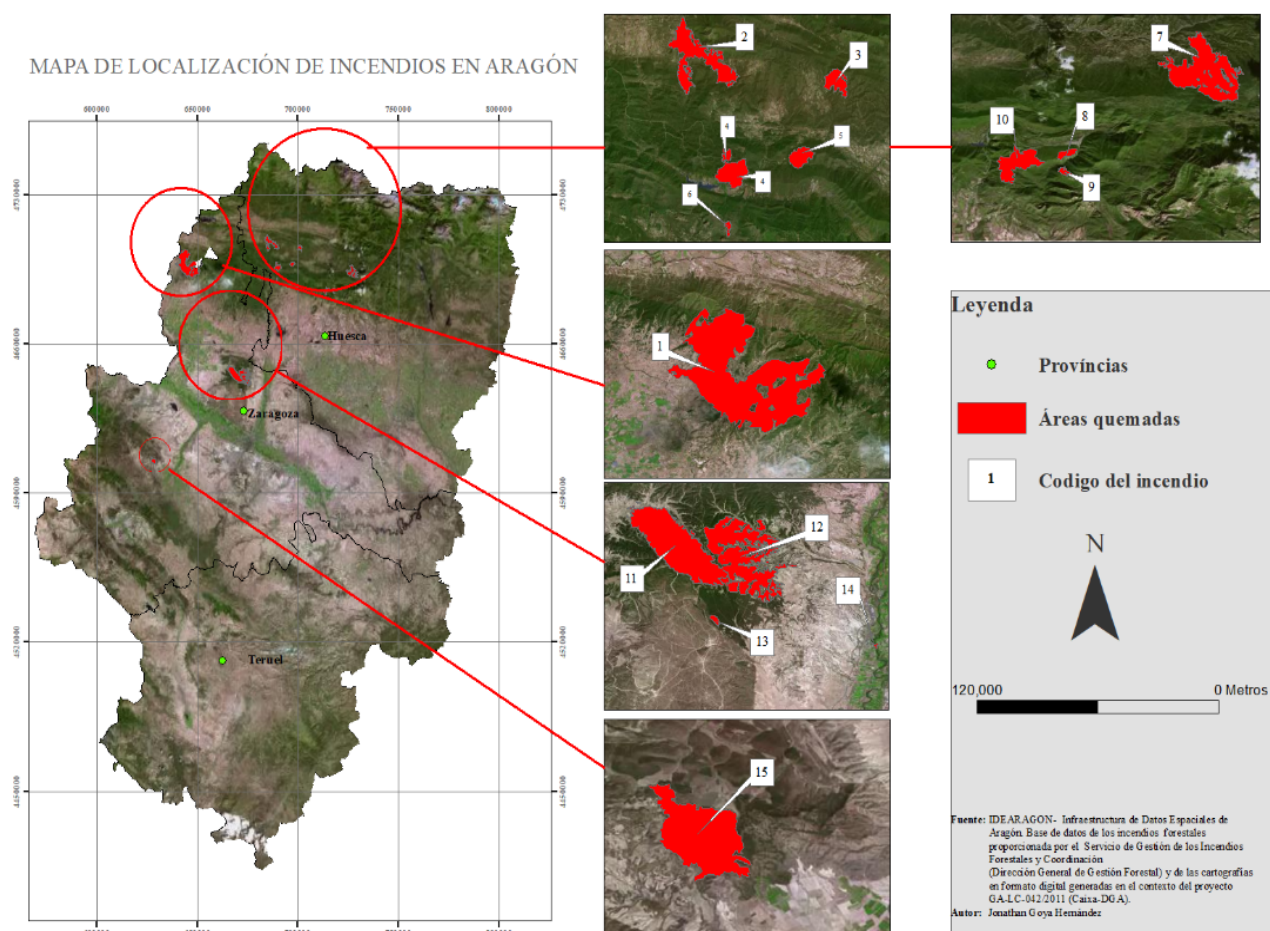


Figura 1. Área de estudio. Localización de zonas quemadas

El clima que caracteriza esta zona se enmarca en los denominados mediterráneos continentalizados, donde las precipitaciones son escasas y muy localizadas debido a la dificultad de penetración de los frentes atmosféricos por la topografía. En cuanto a la temperatura, las medias anuales son elevadas, debido a la situación de interior de la cuenca, sin embargo, la oscilación térmica de este espacio (invierno- verano) es una de las más acusadas de toda la Península Ibérica (Cuadrat Prats, 2004).

Por último, el viento se muestra como otro de los aspectos que caracterizan el clima de esta zona, pues tiene una gran importancia en muchos sectores de Aragón tanto por su frecuencia como por las características particulares que le imprimen al clima. Este se canaliza entre los Pirineos y la Cordillera Ibérica dándose flujos de componente; O-NO denominado Cierzo y los de E-SE de bochorno (Cuadrat Prats, 2004).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Las diferentes actividades y procesos metodológicos realizados se pueden integrar en dos fases principales de trabajo: (1) Recopilación de los materiales de trabajo y (2) Tratamiento digital de la información; en esta última se incluye la caracterización de las superficies quemadas y el tratamiento de las imágenes y de la base de datos de campo. Este proceso aparece representado mediante un esquema de flujo de trabajo en la figura 2. En los siguientes párrafos, se presentan los principales procesos metodológicos seguidos.

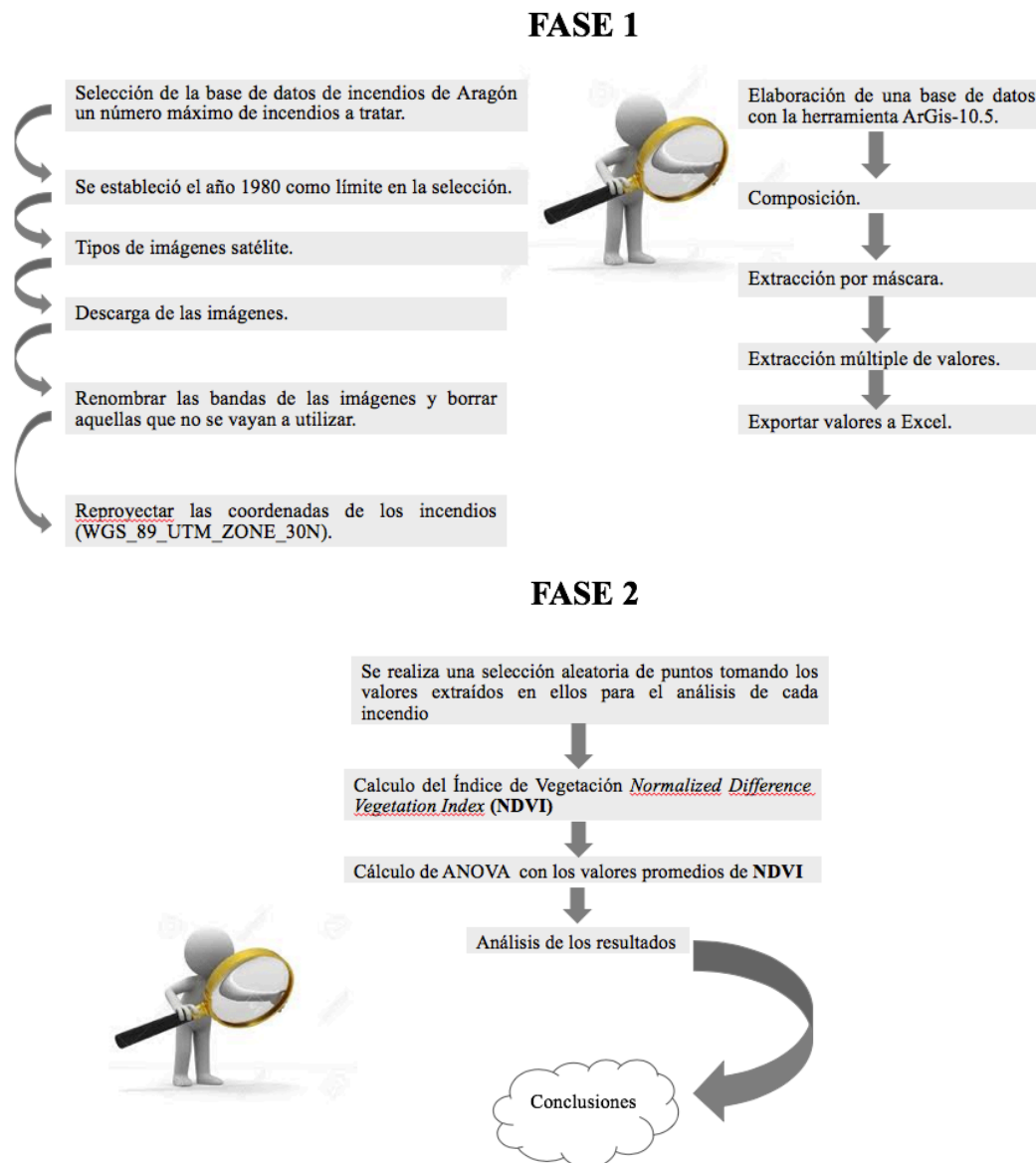


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso metodológico FASE 1 y FASE 2

4.1 Selección de incendios a analizar

La información de partida procede de la base de datos de incendios forestales del Gobierno de Aragón (Dirección General de Gestión Forestal) y de los productos cartográficos obtenidos mediante técnicas de teledetección, desarrollados en el marco del proyecto de investigación GA-LC-042/2011 (Caixa-DGA), realizado por el grupo de investigación GEFOREST. Dicha base de datos contiene información espacial de las zonas quemadas, en formato *shapefile* vectorial (polígonos) incluyendo información como causas del fuego, municipios afectados, año, fecha, provincias, paraje, superficie quemada y superficie total.

La información espacial que contiene la base de datos se ha reproyectado de ED_1990_UTM a WGS_89_UTM_Zone_30N para que coincidan con la proyección de referencia que emplean las imágenes Sentinel-2. También se dispone de una segunda capa *shapefile* en formato de puntos empleada para el muestreo de campo, en ella se ha recopilado información de las coordenadas de muestreo, tanto de los puntos de control (quemados) como de los que no, además del número de la ficha del incendio conectada a los siguientes campos:

- El número de la ficha del incendio
- Nombre y año del incendio.
- Comunidad vegetal pre y post incendio
- Porcentaje de la erosión post incendio.
- Nivel de recubrimiento por estratos
- Porcentaje de representación vegetal por especies.

(nº)	COD_INC	NOMBRE	FECHA	Superficie (ha)
1	293	Sos del Rey Católico	16/07/1994	8078
2	141	Bailo -Peña de Riglos	21/08/1994	1841
3	100	Caldearenas- Jaca	19/08/1986	418
4	85	Las Peñas de Riglos	05/08/1985	735
5	98	Caldearenas	31/07/1986	362
6	84	Las Peñas de Riglos	26/07/1985	57
7	97	Nueno-Sabiñanigo	31/07/1986	1706
8	31	Nueno	01/01/1986	72
9	96	Nueno	30/07/1986	44
10	99	Nueno-Arguis	06/08/1986	508
11	0	Zuera	05/08/2008	2514
12	303	Zuera	23/06/1995	2491
13	0	Zuera	25/06/2006	39
14	0	Zuera	04/05/2008	10
15	298	Épila-Niguella	28/07/1994	431

Tabla 1. Selección de los incendios tratados en este trabajo

Se han seleccionado 15 de los 265 incendios cuya superficie quemada supere las 10 ha documentados en la base de datos. Esta selección se hizo de forma que se obtuvieran incendios de diferente tamaño, antigüedad y localización espacial, como se puede apreciar en la tabla 1. Además, se dispone de información relativa a los niveles de regeneración vegetal obtenida del trabajo de campo realizado en las zonas afectadas por el fuego.

Así mismo, desde la página de IDE Aragón (Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón) <https://idearagon.aragon.es/descargas>, se han obtenido en formato *shapefile* las coberturas correspondientes a los municipios, provincias y comarcas de Aragón e información relativa a los tipos de paisaje (tabla 2).

Nombre y código del incendio	Dominios	Tipo de cubierta
Sos del Rey Católico (1)	Relieve en forma de graderío	Matorral y Bosquetes
	Fondos de valle y depresiones	Secano y regadío
Bailo (2)	Sierras Pirenaicas de conglomerado y areniscas	Pinares y matorral
Caldearenas (3)	Sierras Pirenaicas de conglomerado y areniscas	Pinares y matorral
Las Peñas de Riglos (4)	Sierras Pirenaicas de conglomerado y areniscas	Pinares y matorral
	Fondos de valle y depresiones	Secano y regadío
Caldearenas (5)	Sierras Pirenaicas de conglomerado y areniscas	Pinares y matorral
Las Peñas de Riglos (6)	Sierras Pirenaicas calcáreas Montaña media	Matorrales de frondosas y repoblación de coníferas
Nueno (7)	Sierras Pirenaicas de conglomerado y areniscas	Pinares y matorral
Nueno (8)	Sierras Pirenaicas calcáreas Montaña media	Matorrales de frondosas y repoblación de coníferas
Nueno (9)	Sierras Pirenaicas calcáreas Montaña media	Matorrales de frondosas y repoblación de coníferas
	Cañones Pirenaicos con paredones	Frondosas y matorrales
Nueno (10)	Sierras Pirenaicas calcáreas Montaña media	Matorrales de frondosas y repoblación de coníferas
Zuera (11)	Sierras calcáreas de la depresión del Ebro	Pinares, matorrales, secanos
	Piedemontes	Secanos y cultivos en mosaico
Zuera (12)	Sierras calcáreas de la depresión del Ebro	Pinares, matorrales, secanos
	Piedemontes	Secanos y cultivos en mosaico
Zuera (13)	Piedemontes	Secanos y cultivos en mosaico
Zuera (14)	Amplios fondos de valle	Secano y regadío
Épila (15)	Sierras Ibéricas calcáreas de montaña media	Matorrales, coníferas y secano
	Amplios fondos de valle y depresiones	Secano y regadío
	Piedemontes	Secano y cultivos en mosaico
	Sierras ibéricas metamórficas de montaña media	Matorral, frondosas y coníferas

Tabla 2. Dominios de paisaje y tipos de cubierta correspondiente a las zonas quemadas.

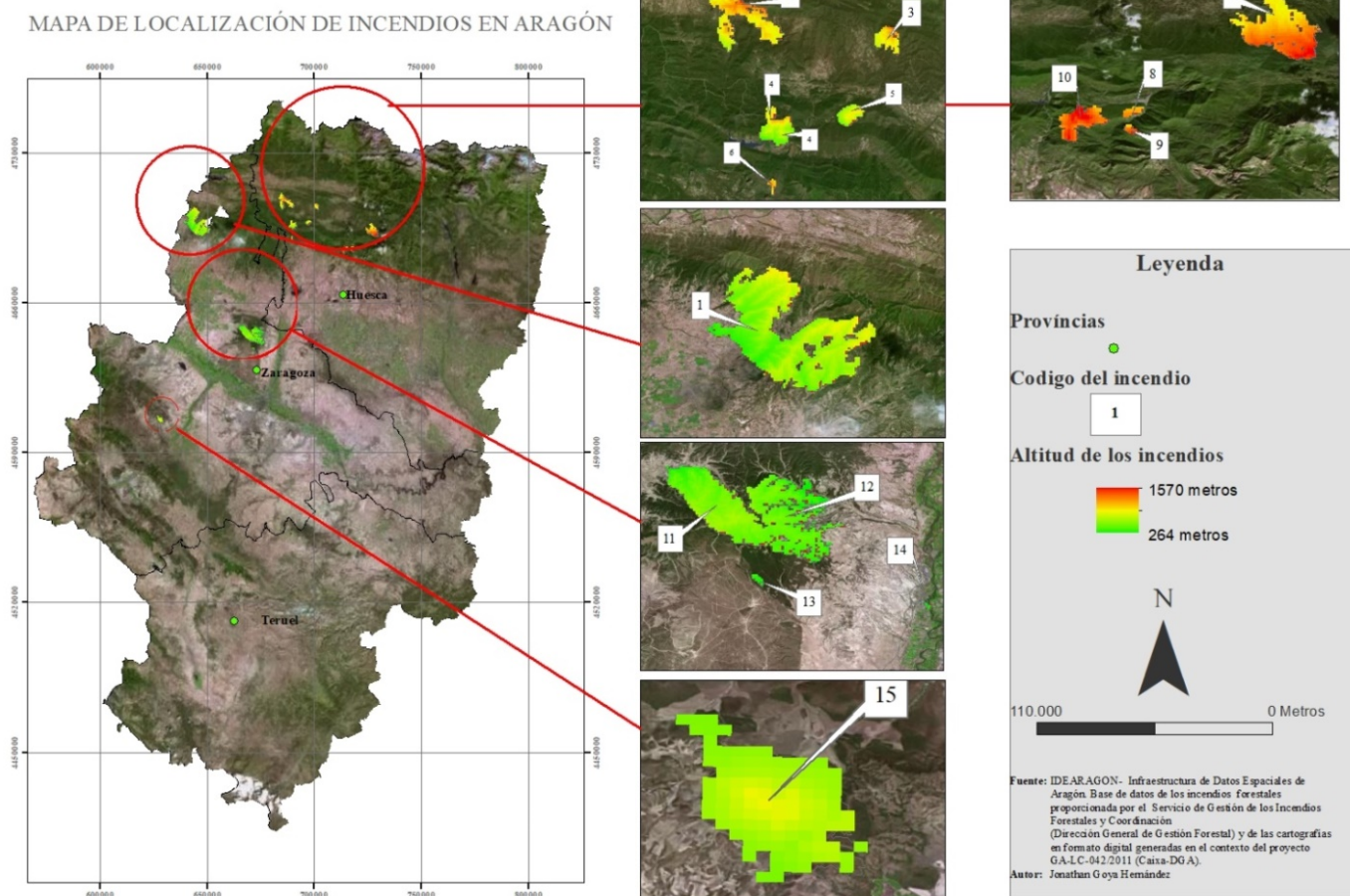


Figura 3. Localización de las zonas quemadas y su altitud

4.2 Selección, obtención y tratamiento de las imágenes

Con el objeto de realizar un análisis de los niveles de regeneración vegetal en el año 2017 a través de índices espectrales, se han utilizado imágenes procedentes del satélite Sentinel-2A. Este satélite, incluido en el programa COPERNICUS¹ (*European Space Agency- ESA*), lleva a bordo un sensor multispectral (*MultiSpectral Instrument- MSI*) que proporciona imágenes en 13 bandas espectrales en un rango comprendido entre los 443 nm y los 2190 nm (VNIR y SWIR), a diferente resolución espacial. Esta cámara espectral inspirada en las misiones francesas SPOT y las estadounidenses LANDSAT, posee dos planos focales, uno en las bandas del visible (VIS) y el infrarrojo próximo (NIR) y otro en el infrarrojo medio (SWIR). La toma de imágenes se realiza mediante un sistema de barrido

¹ El Sistema Europeo de Observación de la Tierra (COPERNICUS), es una iniciativa que parte la acción conjunta de la Comisión Europea y de la Agencia Espacial Europea para formar una red de recogida y difusión de datos sobre el medio ambiente y la seguridad (incluir alguna referencia bibliográfica o página web), que sirva como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones y como respaldo a la investigación.

a lo largo de a la trayectoria (*Push-broom*), generando productos de 290 km de ancho. En la tabla 3 se recogen las características principales de este sensor, destacando la diferente resolución espacial que encontramos en función de los rangos de longitud de onda.

En concreto se han empleado las orto-imágenes (UTM/WGS8) correspondientes a todos los tiles (100x100 km²) del producto Level-2A que coincidieran espacialmente con las áreas incendiadas. Este producto presenta un nivel de procesamiento avanzado que proporciona información reflectividad superficial (*Bottom Of the Atmosphere* -BOA) aplicarse el propio algoritmo de corrección ideado por la ESA denominado SEN2COR. Este procedimiento permite pasar de un nivel 1C a 2A, reproduciendo la estructura estandarizada de carpetas y archivos de bandas originales y realizando un redimensionado de los píxeles a diferentes resoluciones (10, 20 y 60). El algoritmo corrige la presencia de cirrus y evalúa los niveles de transmisividad atmosférica mediante la generación de una banda sobre la distribución espacial del espesor óptico atmosférico (Aerosol Optical Thickness-AOT).

Las imágenes de satélite se han descargado mediante la plataforma de acceso abierto Sentinel Hub. Este sistema permite el acceso completo y gratuito a los productos de usuario de Sentinel-1, Sentinel-2 y Sentinel-3, a través del punto de acceso para usuarios de API (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Las múltiples imágenes utilizadas para este trabajo (correspondientes a 2017) se han seleccionado en función de la presencia de nubes, adquiriéndose únicamente aquellas que no se viesen afectadas por este fenómeno. Además, se ha construido una serie multitemporal de imágenes con objeto de poder caracterizar la estacionalidad fenológica de las formaciones vegetales que colonizan los espacios quemados. De este modo se han seleccionado imágenes de primavera (mayo), verano (junio, julio y agosto) y principios de otoño (septiembre). La disponibilidad de imágenes en diferentes momentos a lo largo del año permite tanto el análisis de la variabilidad fenológica, como la minimización de sus consecuencias a la hora de cuantificar los niveles de regenerados generales para 2017, permitiendo una comparación más robusta con otros años.

Teniendo en cuenta los criterios de selección de las imágenes y la gran cantidad de archivos que implica (aunque existe la posibilidad de automatizar el proceso de descarga mediante un script) se ha optado por un procedimiento interactivo que permitiera supervisar visualmente cada caso con el fin de evitar la interferencia de nubes sobre las zonas incendiadas. Las imágenes se han descargado con una resolución espacial de 10 y 20 m tabla 4 ANEXO.

Nº de banda	Longitud de onda (nm)	Tamaño del pixel (m)
2	490	10
3	560	10
4	650	10
8	842	10
5	705	20
6	740	20
7	783	20
8	865	20
11	1610	20
12	2190	20
1	443	60
9	940	60
10	1375	60

Tabla 3. Características principales del sensor Sentinel-2

4.2.1 Extracción y preparación de las bases de datos

La secuencia metodológica aplicada en esta fase se estructura siguiendo las siguientes etapas o fases de trabajo.

Primero se ha realizado un renombrado de los ficheros correspondientes a las bandas de cada una de las imágenes a 10 y 20 m resolución espacial. De ahora en adelante se hará referencia como R10 y R20 respectivamente, con el fin de mejorar la lectura y comprensión del documento.

A continuación, se ha elaborado un fichero *multilayer* compuesto por todas las bandas correspondientes a R10 y R20, respectivamente. Este proceso se ha seguido para todos los incendios en todos los diferentes meses comprendidos en el análisis temporal. Seguidamente se ha realizado una extracción por máscara de la información relativa a los valores de reflectividad del *multilayer* generado en la fase anterior consiguiendo un ráster de las zonas quemadas.

Por último, se han transformado las imágenes resultantes, a un *shapefile* de puntos y se ha hecho un muestreo doble (Muestra 1 (M1) y Muestra 2 (M2) con el propósito de proporcionar mayor robustez a los análisis estadísticos y minimizar los efectos de autocorrelación espacial en cada imagen R10 y R20. Cada muestreo consta de 200 puntos distribuidos aleatoriamente en cada uno de los 15 incendios analizados, lo que hace un total de 3000 puntos (n=3000) Finalmente se han extraído los valores de reflectividad superficial correspondientes a los puntos de las imágenes, eliminando los valores erróneos, es decir puntos sin reflectividad (-999999) o bandas con valores cuya reflectividad fuese 0.

4.2.2 Cálculo de los Índices espectrales

En este trabajo se pretende cuantificar la vegetación regenerada a largo plazo en zonas quemadas en diferentes fechas y localizaciones. Para ello se han utilizado los índices espectrales NDVI y NBR. A continuación, se presenta de forma detallada el proceso que se llevó a cabo para el cálculo de cada índice de vegetación, con las variaciones hechas en este estudio tras el renombrado de las bandas.

Para el cálculo de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) son necesarias la banda del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC). Este índice minimiza los efectos topográficos produciendo una escala lineal. Los valores van desde -1 a 1 donde 0 representa momento donde empieza la ausencia de vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación. En este caso, al renombrar las bandas para las imágenes de resolución espacial de 10 y 20 metros, se ha aplicado la fórmula de la tabla 5. Este índice se empleará para comparación de los datos, debido a la facilidad de su cálculo y su sencillez en la interpretación. Así mismo, es el índice más utilizado por los diferentes investigadores, lo que permitirá hacer comparaciones entre ellos.

Rouse et al. (1974) $NDVI = (IRC - R) / (IRC + R)$		
Resolución espacial de la imagen (m)	Longitud de onda (nm)	Fórmula para cada imagen Sentinel- 2A
10	Banda 4 = 842 Banda 3 = 665	$NDVI = (Banda\ 4 - Banda\ 3) / (Banda\ 4 + Banda\ 3)$
20	Banda 4 = 705 Banda 7 = 865	$NDVI = (Banda\ 7 - Banda\ 4) / (Banda\ 7 + Banda\ 4)$

Tabla 5. Cálculo del NDVI para nuestro estudio de caso

El *Normalized Burn Ratio* (NBR), se trata de un índice que se puede calcular de forma simple. Utilizado para evaluar el área quemada y la severidad del incendio. Para calcularlo se emplean las bandas del infrarrojo cercano (IRC) y el infrarrojo medio (SWIR). Por ello, este índice solo se puede calcular para las imágenes de 20 m de resolución espacial, ya que las imágenes de 10 m de resolución espacial carecen de una banda en el SWIR. Así pues, las bandas de Sentinel que deberíamos utilizar serían la banda 8 y la banda 12 respectivamente. Debido a que hemos renombrado las bandas como se ha comentado anteriormente, la fórmula que se ha empleado es la que se muestra en la tabla 6.

NBR= (IRC-SWIR) / (IRC+SWIR)		
Resolución espacial de la imagen (m)	Longitud de onda (nm)	Fórmula para cada imagen Sentinel- 2A
20	Banda 7 = 865 Banda 9 = 2190	$NBR = (Banda\ 7 - Banda\ 9) / (Banda\ 7 + Banda\ 9)$

Tabla 6. Cálculo del índice NBR para nuestro estudio de caso

4.3 Áreas de muestreo de campo

En el marco del proyecto de investigación GA-LC-042/2011 (Caixa-DGA), a partir de diferentes campañas de trabajo de campo, se generó una base de datos sobre las comunidades vegetales que colonizan muchas de las superficies quemadas que se utilizan en este trabajo y sobre el estado del suelo en relación con la actividad erosiva y diferentes parámetros edáficos.

Esta base de datos y, en concreto las variables relacionadas con la vegetación, será utilizada para comprobar el grado de correspondencia que existe entre los valores de los índices de vegetación y las variables relacionadas con el desarrollo de la misma tras el paso del fuego. Además, permiten tener una idea de las características previas de la vegetación existente anterior al incendio, dado que cada una de las áreas test que forman esta base de datos se compone de un sector quemado (localizado dentro del perímetro del incendio) y un sector no quemado o control, con las mismas características físicas que el anterior. Estos sectores control se ubican en zonas próximas a las áreas incendiadas o en pequeñas parcelas dentro de los perímetros no quemados.

Las observaciones y mediciones de campo se han realizado siguiendo los protocolos de campo modificados de Pérez-Cabello (2002). En la determinación de los puntos para realizar las mediciones a nivel edáfico se descartan micro-ambientes fuertemente erosionados, o que muestren evidencia de actividad antrópico-animal (pequeñas sendas, zonas compactadas por pisoteo o maquinaria, etc.).

El diagnóstico vegetal se realizó mediante el análisis de la composición florística y la fisionomía de los estratos que conforman cada comunidad. Realizando inventarios florísticos y computando el porcentaje de recubrimiento (la proporción del terreno ocupado por la proyección perpendicular de las partes aéreas de los individuos de cada una de las especies y de los estratos considerados) de cada especie en relación con la superficie del inventario y con la del estrato donde se sitúa siguiendo la metodología de Braun-Blanquet (1979) y Bertrand (1966). En este TFM se utilizaron especialmente dos parámetros de crecimiento de la vegetación: el promedio del crecimiento de los estratos arbóreo y arbustivos (E1-2) y sub-arbustivo y herbáceo (E4-5) (tabla 7).

4.4 Análisis estadístico de los incendios forestales a partir de índices espectrales

Teniendo en cuenta la hipótesis de este trabajo, la existencia de una correspondencia entre la magnitud y la variabilidad de los índices espectrales en los diferentes incendios y la respuesta vegetal, se han seleccionado técnicas estadísticas para corroborarla.

En primer lugar, una vez calculados los índices de vegetación y, de cara a la comparación entre incendios, se obtuvieron diferentes estadísticos descriptivos para analizar la dispersión y centralidad (promedio, desviación, máximos y mínimos) de los valores en cada incendio a escala mensual y considerando conjuntamente todos los meses disponibles.

En segundo lugar, mediante la aplicación de análisis de varianza (ANOVAS) y el test de *Bonferroni* (figura 4), se identificaron agrupaciones de incendios con valores de NDVI semejantes en relación a la respuesta ante el fuego. Esta técnica estadística, desarrollada en 1930 por R.A. Fisher, se utiliza para identificar la existencia de diferencias entre dos muestras o grupos; en nuestro caso los diferentes incendios forestales considerados, siendo la variable dependiente el promedio de los valores de NDVI correspondientes a 4 fechas diferentes a lo largo de 2017. Se ha realizado un muestreo aleatorio distribuyendo un total de 200 observaciones en cada incendio; esto proceso se ha repetido dos veces para dar mayor robustez a los análisis de varianza analizados.

En tercer lugar, se determinan agrupaciones de observaciones mediante, gráficos, análisis clúster y árboles de decisión (jerárquicas y no jerárquicas, respectivamente), teniendo en cuenta la variabilidad fenológica de cada pixel. En el caso de las agrupaciones no jerárquicas se utiliza el algoritmo *K-means* (Wilks' Lambda) (figura 5), mientras que, en el caso de las jerárquicas, se emplean función de árboles de clasificación y de decisión para identificar agrupaciones de elementos/observaciones y descubrir las relaciones entre dichas agrupaciones.

En nuestro caso, disponemos de 13 grupos de píxeles que se corresponde con 13 superficies quemadas en diferentes momentos y localizaciones. Dos de los incendios de la serie original (14 y 15), Zuera y Epila son descartados en este análisis debido a la escasa superficie y a la localización más marginal del incendio de Épila. Cada incendio tiene unas características, en este caso espectrales, mediante las cuales y a partir de un aprendizaje inductivo, se genera un mecanismo que nos permite inferir su clasificación. Se trata en definitiva de obtener patrones para averiguar el grado de similitud/diferencias entre superficies afectadas por incendios forestales. Su identificación permitiría confirmar la eficacia de las variables espectrales (índices) y la posibilidad de utilizarlo como mecanismo para identificar otras zonas quemadas no documentadas.

En concreto se ha utilizado el algoritmo de árbol CHAID (*Chi-square automatic interaction detector*) (figura 5) que permite la detección automática de interacciones mediante Chi-cuadrado. El algoritmo CHAID identifica las variables que permiten dividir mejor los tipos de incendios. De este modo comprobamos dos aspectos reseñables: 1) por

un lado si los incendios se diferencian en función de las variables espectrales y, si es así, 2) cual es la variable con mayor protagonismo para diferenciar los diferentes tipos de incendios. Además, mediante un sistema de validación (validación cruzada o validación por división muestra) se puede evaluar la bondad de la estructura.

Finalmente se puede obtener una matriz de confusión que sintetiza las correspondencias entre la clasificación original y la reclasificación de las observaciones que realiza el algoritmo. Ello nos permite diagnosticar rápidamente el porcentaje de las observaciones “bien clasificadas”, esto es, la ratio entre el número de observaciones que han sido bien clasificadas y el número total de observaciones.

TEST DE BONFERRONI

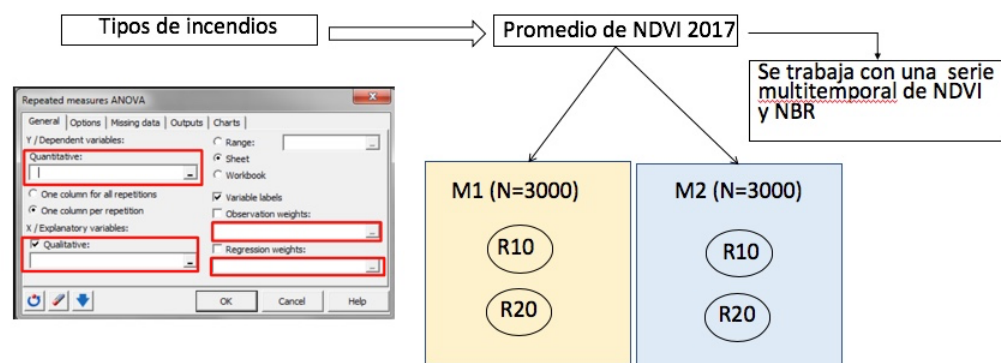


Figura 4. Esquema de la metodología empleada para el cálculo del *Test de Bonferroni*

K-MEANS + CHAID ALGORITHM

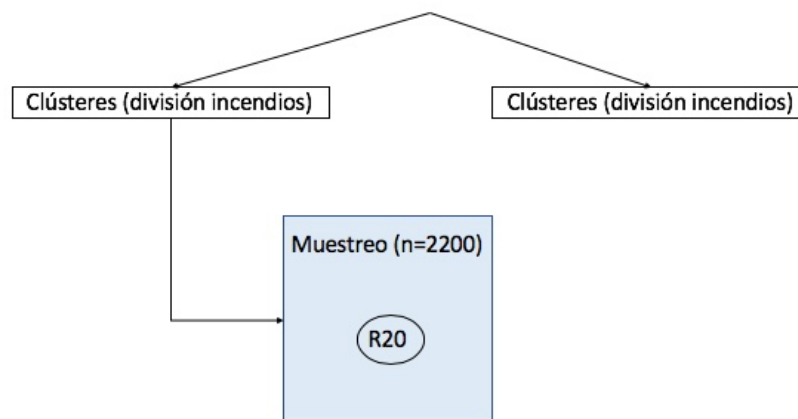


Figura 5. Esquema de la metodología empleada para el cálculo de *K-Means* y *CHAID Algorithm*

N°	E12		E54		PROMEDIO E1-2	PROMEDIO E5-4	PH	PS	PN	QIF	BS	QCC	GS	Gram	Junip	Ros	Ros			
	3	20	31	70																
1	6	102	11,5	50,5	119,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	0,00	0,00			
	5	142				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	3	115				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	10	103	4,7	119,7	119,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	13,33	0,00	0,00	1,75		
	21	103				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	4,25
	4	75				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,75
3	0	81	11,7	93,7	93,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	2,00		
	2	121				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,71
	4	135				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,00	0,00	0,00	0,00
4	4	135	9	117,5	117,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	6,67	1,00	0,00	5,75		
	14	100				0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,50	0,00	0,00	0,00	1,25
	0	107				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,75
5	0	102	0	104,5	104,5	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	7,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00		
	0	122				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,00	1,67	20,00	1,67	0,00	0,00	0,00
	0	80				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	6,67	0,71	0,00	0,00
6	95	10	47,5	31	31	21,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	0	52				3,75	0,00	0,00	0,00	1,43	1,25	30,00	0,00	0,00	0,00	6,00	0,00	1,00	0,00	0,00
	0	113				1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	1,67	5,43	0,00	0,00
7	43	102	21,5	100	100	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,00	0,00	0,00	3,00			
	0	98				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	1,43	0,00	0,00
	0	98				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 7. Porcentaje de recubrimiento de la vegetación por especie y estrato vegetal (E). (E1= arbóreo >5m; E2= arbóreo < 5; E4= subarbustivo <1m; E5= herbáceo. *Pinus halepensis* (PH); *Pinus silvestre* (PS); *Pinus nigra* (PN); *Quercus ilex* (QIF); *Buxus sempervirens* (BS); *Quercus cocifera* (QCC), *Genistas scorpius* (GS); Gramíneas (Gram); *Juniperus* (Junip); Rosáceas(R).

5. RESULTADOS

En las siguientes secciones se presentan los resultados generales de este trabajo fin de master en concordancia con los objetivos propuestos al inicio del documento. Se combina la información correspondiente a la magnitud de la regeneración a través de los valores de NDVI y las mediciones en campo relativas a las características de la vegetación colonizadora, en lo que constituye una primera aproximación a la traducción en términos fisiológicos de las magnitudes del NDVI y la importancia de la resolución espacial en las imágenes Sentinel-2.

5.1 Distribución de los valores de NDVI a 10 m de resolución (R10)

Desde el punto de vista de la presentación de los resultados, las imágenes Sentinel-2 a 10 y 20 m de resolución espacial se mencionarán mediante los códigos R10 y R20, con el objeto de facilitar la lectura de la misma. Asimismo, las dos muestras diferentes con las que se trabaja para proporcionar mayor robustez a los resultados desde un punto de vista estadístico se denominarán: M1 y M2.

La tabla 9 recoge los estadísticos descriptivos generales de los valores de NDVI correspondientes a las muestras 1 (M1) y 2 (M2) de NDVI R10. Se observa que, tanto en M1 como en M2, los valores máximos de NDVI medios se sitúan en torno a 0.66 en el incendio 5, Caldearenas (1986), mientras que los mínimos también aparecen en un mismo incendio, en este caso en el nº 15 correspondiente a Épila (1994), situado en el punto más meridional de la serie de incendios analizada, que presenta valores ~ 0.45 .

En este caso, el hecho de que el incendio de Caldearenas (1986) haya dispuesto de un periodo más largo para la regeneración podría explicar el mayor nivel de NDVI registrado. Sin embargo, también es cierto que la superficie afectada en el incendio de Épila reúne una serie de características ambientales diferentes al del resto de incendios, al tratarse del único incendio situado en la margen derecha del río Ebro.

Desde el punto de vista de la dispersión de los valores de NDVI, los valores máximos de *Desv. St.* ($\sim 0,17$), tanto en M1 como en M2, los encontramos en el incendio nº 1 correspondiente a Sos del Rey Católico (1994), por lo que se puede afirmar que es el incendio en el que se encuentran la mayor variabilidad en términos de regeneración vegetal, debido, principalmente, al hecho de que es el incendio de mayores proporciones.

De igual modo, los valores mínimos de *Desv. St.* ($\sim 0,06$) en las dos muestras se corresponde con el incendio nº 13 (incendio de Zuera del año 2006). Estos datos siguen la tendencia marcada en los valores de regeneración de NDVI, tal y como se ha podido comprobar en el análisis previo.

En la tabla 9 se muestran los valores de rango de M1 y M2, repitiéndose el patrón comentado anteriormente. En este caso, los valores máximos en ambas muestras son de

0,87 registrados en el incendio de Las Peñas de Riglos de 1985. Por otro lado, los mínimos (0,45) se reconocieron en los incendios nº 8 y 9, ambos localizados en el municipio de Nueno (1986).

Analizando los datos de dispersión de M1 y M2 y el tamaño de los incendios (tabla 8), se constata la existencia de una relación, evidente por otra parte, entre los indicadores de dispersión y el tamaño de los incendios. De modo que el incremento de la superficie quemada significa también un incremento en variabilidad de la magnitud de la regeneración. Destaca sobremanera el incendio nº 1 de Sos del Rey Católico 1994, por ser el incendio de mayor dispersión de toda la muestra, además de ser el de mayor superficie quemada (8.078 ha). Al incrementarse la superficie incendiada, también aumenta la probabilidad de encontrar mayor variabilidad vegetal (fisionómica y taxonómica), así como mayor diversidad en las condiciones topo-morfológicas o tipos de suelo, que determinan distintos ritmos de regeneración, por no hablar de que, en muchos de estos grandes incendios, han sido aplicadas medidas de control hidrológico-forestal para incrementar la recuperación vegetal de estas zonas y disminuir la actividad erosiva, tal y como es el caso del incendios de Sos.

No obstante, esta asunción no siempre se corresponde con la realidad. Existen excepciones como el caso del incendio nº 14 (Zuera 2008), que presenta niveles de dispersión altos y posee una superficie de apenas 10 ha (Tabla 9). Estos niveles de dispersión se deben a que es un tipo de incendio de ribera cuya vegetación predominante tiene un comportamiento diferente a las cubiertas presentes en el resto de las superficies quemadas analizadas.

Código de Incendio (Nº)	Superficie (Ha)
1	8078
11	2514
12	2491
2	1841
7	1706
4	735
10	508
15	431
3	418
5	362
8	72
6	57
9	44
13	39
14	10

Tabla 8. Muestra de los incendios analizados, ordenados de mayor a menor superficie quemada (ha)

Por otro lado, la localización espacial de estos incendios puede estar condicionando el nivel de regenerado, puesto que los incendios que presentan mayores valores de NDVI se

sitúan en la zona Norte de nuestra área de estudio, coincidiendo con las Sierras Pre-pirenaicas y, con climas de carácter sub-mediterráneo. En cambio, el incendio con menos NDVI se localiza en la zona Sur, en donde las condiciones aridez son más características.

N°	R10									
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
	Media		Desv. St.		Min		Máx		Rango	
1	0,50	0,50	0,18	0,18	0,08	0,07	0,87	0,86	0,79	0,79
2	0,59	0,59	0,11	0,12	0,23	0,25	0,89	0,89	0,66	0,63
3	0,55	0,54	0,13	0,14	0,16	0,13	0,83	0,79	0,67	0,66
4	0,60	0,60	0,17	0,16	0,01	0,04	0,89	0,91	0,88	0,87
5	0,68	0,67	0,11	0,11	0,36	0,38	0,90	0,90	0,55	0,52
6	0,58	0,57	0,12	0,12	0,25	0,21	0,90	0,95	0,66	0,74
7	0,54	0,52	0,13	0,13	0,12	0,14	0,86	0,85	0,74	0,71
8	0,65	0,64	0,08	0,09	0,32	0,39	0,80	0,81	0,48	0,42
9	0,67	0,65	0,09	0,09	0,36	0,36	0,84	0,81	0,47	0,45
10	0,59	0,59	0,09	0,08	0,33	0,37	0,82	0,81	0,49	0,44
11	0,49	0,47	0,16	0,18	0,04	0,05	0,81	0,78	0,76	0,73
12	0,65	0,67	0,18	0,16	0,04	0,12	0,92	0,91	0,88	0,79
13	0,48	0,47	0,07	0,06	0,23	0,25	0,71	0,64	0,48	0,40
14	0,74	0,73	0,19	0,19	0,21	0,21	0,98	0,98	0,79	0,79
15	0,44	0,47	0,13	0,14	0,11	0,08	0,83	0,82	0,72	0,74

Tabla 9. Estadísticos descriptivos de los valores de NDVI anual correspondiente a los muestreos M1 y M2 (R10). En rojo los valores mínimos y verde los máximos

5.2 Agrupación de incendios en función del nivel de regeneración (R10)

La identificación de las agrupaciones de incendios se fundamenta en los resultados obtenidos mediante los Test de ANOVA y Bonferroni para comprobar la existencia de diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-value}<0,05$) (tabla 10) entre incendios. En dicha tabla se observa que, tanto para M1 como para M2, existen diferencias significativas ($p\text{-value}<0,0001$) ($F\sim 75$) entre los incendios. En las tablas 13 y 14 se observan las comparaciones por pares de los incendios a través del test de *Bonferroni*. Mientras que, en las columnas, cada una de las Letras en mayúscula identifica una agrupación o tipo de incendios, en las filas se reconoce el carácter de las diferencias entre los mismos, siendo estadísticamente significativas cuando no comparten Fila ni, por supuesto, Letra en mayúscula.

Se han identificado un total de 9 y 7 agrupaciones para M1 y M2, respectivamente. Destaca el incendio n° 11 Zuera 2008 de la M1 por ser el más misceláneo ya que, comparte rasgos similares con las agrupaciones G, H e I. Analizando los datos de campo (tabla 7) de este incendio vemos que sus valores medios porcentuales en el desarrollo de los estratos herbáceos y arbustivos (E4-5) son del 101 %, y del 0% en los estratos arbóreos (E1-2). La

vegetación herbácea-arbustiva que cubre los E1 y E2 está compuesta por: *Rosa sp.* (0.7%), *Juniperus sp.* (5%), *Gramíneas* (20%), *Genistas scorpius* (3%), *Quercus coccifera* (25%). En el caso de E4 y E5 solo hace acto de presencia *Pinus halepensis* (1%). Esta variedad en la vegetación provoca que no se produzcan diferencias significativas entre las categorías G, H e I. Así mismo, en la M1 se pueden hacer tres distinciones en función de las diferencias significativas entre los incendios.

En primer lugar, destacan aquellos que no comparten categoría con otros incendios. Es el caso de los incendios número 5, 9, 12, 14 y 15 (tabla 11), que, a su vez pertenecen a categorías diferentes. La categoría B está formado por los incendios nº 5, 9 y 12. En esta categoría se pueden analizar los datos (tabla 13) del incendio nº 5 y 12 con valores medios porcentuales de 9 y 47,5 en los E1-2 y un valor del 117,5 y 31 en los E4-5, respectivamente.

Los valores de vegetación por especies que componen el incendio nº 5 (tabla 7) son: *Pinus nigra* (~10%), *Pinus silvestre* (0.25%), *Quercus ilex* (4%), *Buxus sempervirens* (4%), *Quercus coccifera* (8%), *Genistas scorpius* (10%), *Gramíneas* (6%) *Rosácea* (1%). Así mismo la vegetación localizada en el incendio nº 12 está compuesta, principalmente, de: *Pinus halepensis* (20%), *Quercus ilex* (1%), *Buxus sempervirens* (1%), *Quercus coccifera* (28%), *Gramíneas* (6%) y *Rosáceas* (1%). Por tanto, se puede afirmar que la categoría B presenta un predominio, en ambos incendios, de la vegetación arbórea en detrimento de la herbácea.

La siguiente categoría que tiene diferencias significativas con el resto de los incendios es la I, constituida por el incendio nº 15 (tabla 11). Analizando los datos de campo (tabla 7), se observa que este incendio presenta valores porcentuales medios en los E1-2 de 21.5 y en los E4-5 de 100. Del mismo modo, la vegetación que coloniza este incendio es: *Pinus halepensis* (10%), *Quercus ilex* (0.71%), *Genista scorpius* (4%), *Gramíneas* (35%) y finalmente *Ros rosáceas* (1%). Se puede extraer una primera conclusión del análisis de estas dos categorías: la agrupación B tiene un perfil de vegetación arbórea a diferencia de la categoría I cuyo perfil se caracteriza por ser herbáceo.

Finamente, la tercera categoría que presenta diferencias significativas y no comparte características con el resto de los incendios es la A, que está formada por el incendio nº 14. Se localiza en una zona de ribera, por lo que su vegetación no puede ser comparada con el resto de los incendios.

Los 6 incendios restantes de la muestra M1 (nº 1, 3, 4, 6, 7 y 8) presentan diferencias poco acusadas entre sí, por lo que se pueden agrupar en dos categorías estas son C, D, E, F y G (tabla 10), de tal forma que se han caracterizado las categorías en función del tipo de vegetación.

Las más próximas a la B tendrán un perfil de vegetación arbórea. En contraposición, encontramos aquellas cercanas a la I, que asumirán un perfil de vegetación herbácea. Los valores recabados en las campañas de trabajo de campo no son suficientes como para confirmar esta tendencia, pero sí nos permite lanzar una primera hipótesis.

La muestra M2 presenta, como ya se ha comentado anteriormente, 7 agrupaciones (tabla 11). A diferencia de M1, los incendios que revelan diferencias significativas pertenecen a las categorías B (nº 5, 9 y 12) y D (nº 2, y 10). Debido a los resultados estadísticos obtenidos, estos incendios podrían compartir agrupación con otros debido a que las diferencias eran poco significativas. Finalmente, la categoría G cuenta con los incendios nº 11, 15 y 13. Es en esta última nace la diferencia entre M1 y M2 ya que, el incendio 11 pasa de poder agruparse en las categorías G, H e I a convertirse en uno de los incendios con mayores diferencias significativas.

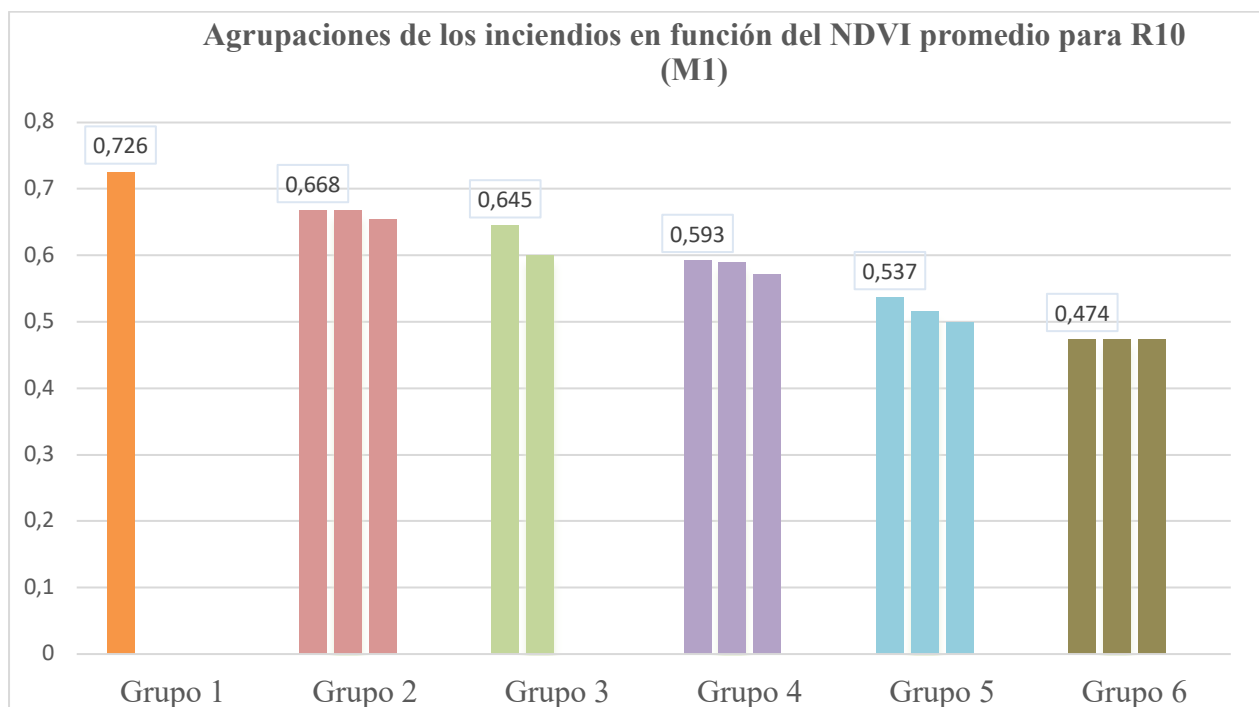
M 1 (R10)					
Análisis de varianza (PROMEDIO):					
Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	14	19,633	1,402	76,785	< 0,0001
Error	2970	54,243	0,018		
Total, corregido	2984	73,877			
<i>Calculado contra el modelo $Y=Media(Y)$</i>					
M 2 (R10)					
Análisis de varianza (PROMEDIO):					
Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	14	18,675	1,334	72,087	< 0,0001
Error	2969	54,938	0,019		
Total, corregido	2983	73,613			
<i>Calculado contra el modelo $Y=Media(Y)$</i>					

Tabla 10. Resumen del análisis ANOVA para M1 y M2 en NDVI R10

n cuanto al resto de los incendios, están distribuidos por categorías del mismo modo que en M1. Esto confirma que la aleatoriedad en la selección de puntos no está influyendo en el resultado final. Del mismo modo, con el objetivo de averiguar si la utilización de la imagen R20 m para el cálculo estadístico de los índices de vegetación influye en el resultado final, se procederá a replicar el mismo procedimiento llevado a cabo hasta ahora.

M 1 (R10)								
Agrupaciones según Bonferroni								
Número de incendio	Medias LS (promedio)	Grupos o categorías						
14	0,726	A						
12	0,668		B					
5	0,667		B					
9	0,654		B					
8	0,645		B	C				
4	0,600			C	D			
2	0,593				D			
10	0,590				D			
6	0,571				D	E		
3	0,537					E	F	
7	0,516						F	G
1	0,499						F	G
13	0,474							G
11	0,474							G
15	0,473							G

Tabla 11. Agrupaciones de los incendios en NDVI R10 a través del test Bonferroni (M1)



Grupos de incendios establecidos con los valores promedios de NDVI para R10 (M1)

Grupo 1; 14 Grupo 2; 12, 5 y 9 Grupo 3; 8 y 4 Grupo 4; 2, 10 y 6 Grupo 5; 3, 7 y 1 Grupo 6; 13, 11 y 15.

Figura 6. Agrupaciones de los incendios en función de los valores promedios de NDVI para R10 (M1)

M2 (R10)									
Agrupaciones según Bonferroni									
Número de incendio	Medias LS (promedio)	Grupos o categorías							
9	0,716	A							
12	0,690	A	B						
14	0,681	A	B						
5	0,659		B						
8	0,640		B	C					
10	0,598			C	D				
4	0,586				D				
2	0,573				D	E			
6	0,562				D	E	F		
15	0,524					E	F	G	
3	0,520					E	F	G	
7	0,509						F	G	H
13	0,495							G	H
1	0,491							G	H
11	0,459								H

Tabla 12. Agrupaciones de los incendios en R10 a través del método *Bonferroni* para M2

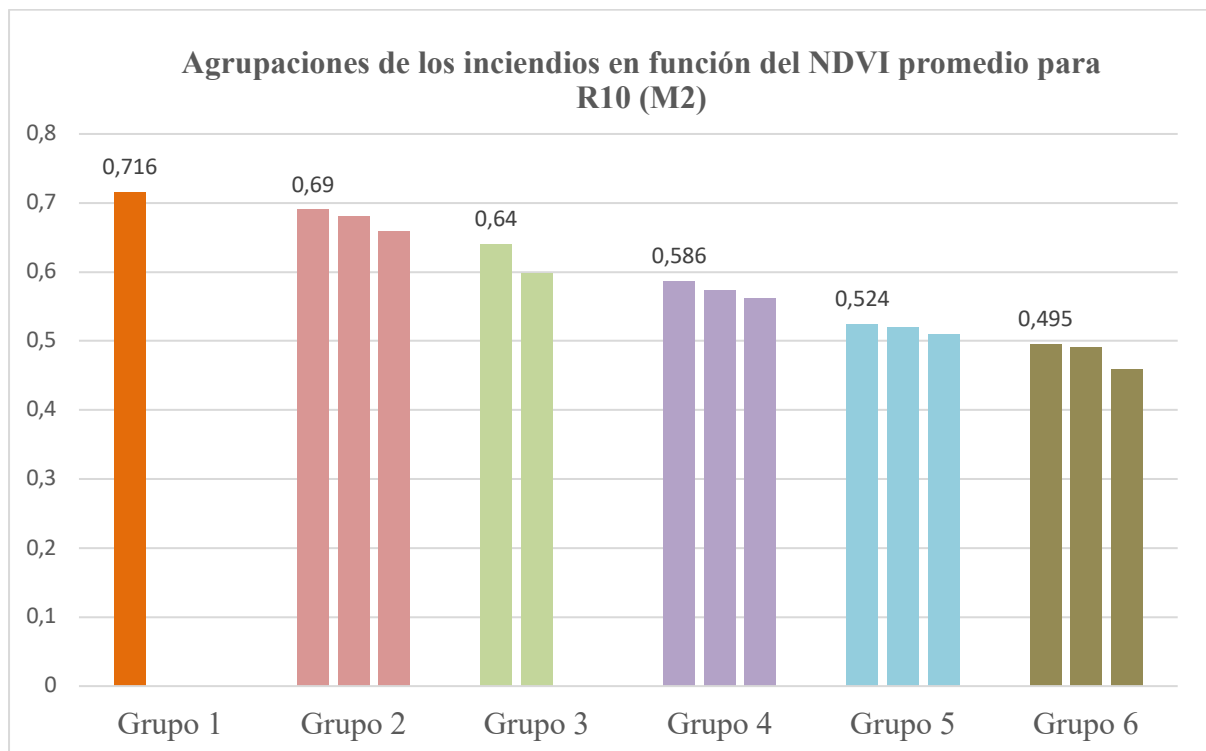


Figura 7. Agrupaciones de los incendios en función de los valores promedios de NDVI para R10

Grupos de incendios establecidos con los valores promedios de NDVI para R10 (M2)

Grupo 1; 9 Grupo 2; 12, 14 y 5 Grupo 3; 8 y 10 Grupo 4; 2, 4 y 6 Grupo 5; 3, 7 y 15 Grupo 6; 1, 13 y 11

(M2)

5.3 Distribución de los valores de NDVI a 20 m de resolución (R20)

La tabla 13 recoge los estadísticos descriptivos generales de los valores de NDVI correspondientes a las muestreas M1 y M2 de R20. Se observa que, tanto en M1 como en M2, los valores máximos de NDVI medios coinciden en el mismo incendio (nº 9 Bueno 1986). A pesar de ello, presentan valores diferentes pues en M1 los valores alcanzan 0.70 y en M2 los valores se sitúan en torno a 0.40. En cuanto a los valores mínimos, para M1 se sitúa en torno a 0.40 en el incendio nº 13 Zuera 2006. Por su parte, para M2 los valores alcanzan 0.29 en el incendio nº 15 Épila 2004.

A pesar de esta diferencia en los valores mínimos, la coincidencia de los valores máximos en un mismo incendio indica que, tanto para M1 como para M2, el incendio nº 9 (Valleclusa) es el de mayor regeneración vegetal. De igual modo, en cuanto a la dispersión de los valores de *NDVI*, se establecen unos valores máximos de *Desv. St* (~0.12) en el incendio nº 11 Zuera 2008 para la M1 y M2, caracterizándolo como el incendio de mayor variabilidad en cuanto a la regeneración vegetal. Los valores mínimos, al igual que los máximos, se concentran en ambas muestras M1 y M2 en un mismo incendio: el nº 13 Zuera 2006, siendo este el incendio de menor variabilidad en regeneración vegetal.

(Nº)	R20									
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
	<i>Media</i>		<i>Desv. St.</i>		<i>Min</i>		<i>Máx</i>		<i>Rango</i>	
1	0,55	0,34	0,13	0,10	0,13	0,08	0,90	0,64	0,77	0,56
2	0,59	0,40	0,12	0,08	0,14	0,25	0,93	0,64	0,79	0,40
3	0,55	0,37	0,11	0,08	0,12	0,10	0,81	0,56	0,68	0,46
4	0,58	0,40	0,13	0,09	-0,01	0,06	0,84	0,59	0,85	0,53
5	0,64	0,45	0,09	0,06	0,43	0,28	0,86	0,59	0,43	0,31
6	0,59	0,39	0,09	0,08	0,37	0,24	1,03	0,69	0,66	0,45
7	0,55	0,36	0,14	0,08	0,13	0,17	0,86	0,55	0,73	0,38
8	0,67	0,42	0,07	0,05	0,25	0,29	0,80	0,51	0,56	0,22
9	0,73	0,44	0,09	0,06	0,44	0,30	0,90	0,58	0,46	0,29
10	0,64	0,40	0,08	0,05	0,32	0,22	0,96	0,55	0,64	0,33
11	0,50	0,32	0,18	0,10	-0,05	0,02	0,94	0,51	0,99	0,49
12	0,63	0,41	0,15	0,10	0,03	0,10	0,91	0,61	0,88	0,51
13	0,47	0,31	0,07	0,04	0,15	0,14	0,67	0,40	0,52	0,26
14	0,84	0,53	0,21	0,14	0,27	0,22	0,91	0,84	0,98	0,63
15	0,41	0,29	0,10	0,07	0,13	0,09	0,69	0,45	0,56	0,36

Tabla 13. Estadísticos descriptivos de los valores de NDVI anual correspondiente al muestreo M1 y M2 en R20. En rojo los valores mínimos y verde los máximos

Siguiendo con el análisis de la dispersión los valores máximos registrados en el rango, para M1 y M2 se registran en aquellos incendios de mayor superficie (nº 1, 2, 11, 12) (tabla

8) al igual que en la imagen R10. Del mismo modo, los valores mínimos se establecen en aquellos incendios (nº 5, 9 y 13) de menor superficie (tabla 10).

A diferencia de la imagen R10, el incendio que registra valores más altos de dispersión es el número 11 Zuera 2008 cuya superficie es de 2.514 ha (tabla 8). Esto confirma la hipótesis que se planteaba anteriormente: a mayor superficie quemada, los valores de dispersión aumentarían en la misma proporción.

5.4 Agrupación de incendios en función del nivel de regeneración (R20)

Para NDVI (R20) se realizó la misma comprobación que en el caso de NDVI (R10). En la tabla 14 se puede observar que, tanto para M1 como para M2, las diferencias existentes presentan un valor de ($p\text{-value} < 0,0001$), lo que se traduce en grandes desacuerdos entre los incendios en ambas muestras que además presentan valores de $F \sim 109$.

M 1 (R20)					
Análisis de varianza (PROMEDIO):					
Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	14	11,144	0,796	109,823	< 0,0001
Error	2984	21,628	0,007		
Total corregido	2998	32,773			
<i>Calculado contra el modelo $Y=Media(Y)$</i>					

M2 (R20)					
Análisis de varianza (PROMEDIO):					
Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	14	10,698	0,764	114,183	< 0,0001
Error	2984	19,970	0,007		
Total corregido	2998	30,668			
<i>Calculado contra el modelo $Y=Media(Y)$</i>					

Tabla 14. Diferencias significativas en al menos dos categorías para M1 y M2 en R20

En las tablas 18 y 19 se observan las comparaciones por pares de los incendios mediante del test de *Bonferroni*.

En este producto de regeneración, al igual que en R10, se contabilizan 7 y 9 agrupaciones para M1 y M2 respectivamente. Destacan los incendios nº 2 (Bailo 1994) y 4 (Las Peñas de Riglos 1985) de M2 (tabla 16) por ser incendios que comparten características comunes con tres categorías: la C, D y E. En el caso del incendio nº 2, este posee unos valores porcentuales medios de los estratos arbóreos (E1-2) en torno al 5% y en E4-5 inferiores a 120%. El reparto porcentual de la vegetación presente en la zona afectada por este incendio, según los datos de campo registrados en la tabla 7, se reparte de la siguiente manera: *Pinus nigra* (10%), *Quercus ilex* (2%), *Buxus sempervirens* (4%), *Genistas scorpius* (28%) y Gramíneas (30%). Así mismo, el incendio nº4 presenta valores de los E1-2 de (1%) y E4-5 de (101%). La vegetación que se localiza en este incendio según los datos de campo (tabla 7) está compuesta por: *Buxus sempervirens* (3%), *Quercus coccifera* (4%), *Genistas scorpius* (16%) y Gramíneas (38%).

Tal y como se ha descrito anteriormente, la muestra M1 cuenta con 7 agrupaciones, de las cuales las letras A, B, D y G revelan diferencias significativas en los incendios nº 2, 4, 5, 9, 10, 11, 13 y 15, con respecto al resto de agrupaciones.

- La categoría A que está formada por el incendio nº 14 (tabla 15). Se localiza en una zona de ribera, por lo que su vegetación no puede ser comparada con el resto de los incendios.
- En la categoría B (tabla 18) los incendios que manifiestan estas diferencias son el nº 5 y 9, donde, observando los datos de campo de la tabla 9, se comprueba que los estratos E1-2 poseen unos valores del 9% y en E4-5 del 117%. de igual modo, el reparto porcentual de la vegetación respecto al total que se registra en esta categoría es el siguiente: *Pinus sylvestris* (0.25%), *Pinus nigra* (10%), *Quercus ilex* (4%), *Buxus sempervirens* (4%), *Quercus coccifera* (8%), *Genistas scorpius* (10%), Gramíneas (6%) y *Juniperus* (6%).
- La categoría D (tabla 15) está formada por los incendios nº 2,4 y 10. Estudiando los datos de campo de la tabla 7, se observa que los valores registrados de los estratos E1-2 y E4-5 son de (3%) y (116%), respectivamente. En cuanto a los valores de presencia registrados en los incendios nº 2 y 4 (tabla 7) son: *Pinus nigra* (10%), *Quercus ilex* (1%), *Buxus sempervirens* (5%), *Quercus coccifera* (3%), *Genistas scorpius* (20%) y Gramíneas (30%).
- La categoría G (tabla 15) está compuesta por los incendios nº 11,13 y 15. Además de ser una categoría que tiene diferencias notables con el resto de los incendios, es la única de la que se tienen datos de campo de todos sus incendios. En los estratos E1-2 se han obtenido valores de (4%), mientras que, en los E4-5, las cifras registradas son de (108%). El tipo de vegetación que se ha registrado (tabla 7) en estos incendios es: *Pinus halepensis* (9%), *Quercus ilex* (0.60%), *Quercus coccifera* (20%), *Genistas scorpius* (5%), Gramíneas (25%), y *Juniperus* (5%).

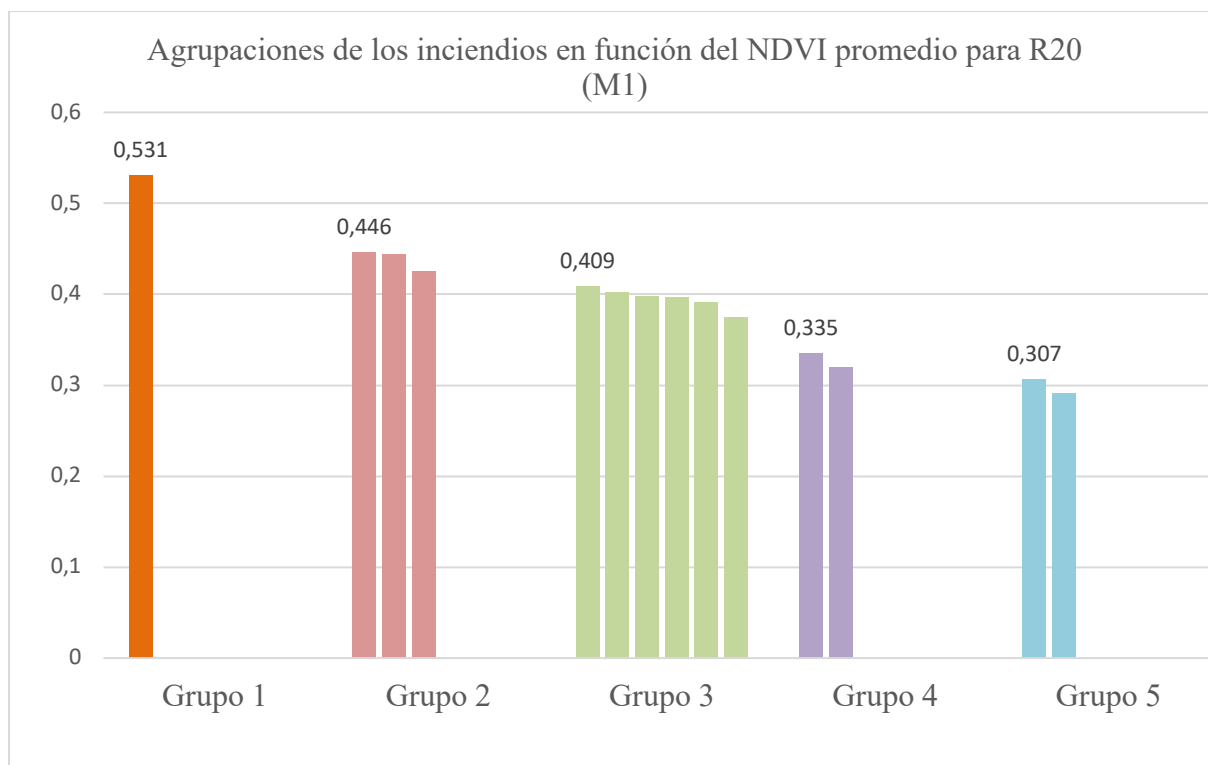
Las categorías C, E y F se caracterizan por ser agrupaciones cuyas diferencias no son significativas con el resto de los incendios. Por lo tanto, se pueden reagrupar con otras. Los incendios que participan en estas categorías son los números 1, 3, 6, 7, 8 y 12 (tabla 15).

La muestra M2 (tabla 16) cuenta con 9 agrupaciones entre las que se encuentran aquellas que presentan diferencias significativas:

- La categoría B se compone de los incendios nº 5 y 9 (tabla 16). El tipo de vegetación que se registra en estas categorías (tabla 9) presenta unos valores en los E1-2 de (~8%) y en E4-5 de (~110%). En cuanto al reparto de vegetación respecto al total se han recogido los siguientes datos: *Pinus sylvestris* (0.20%) *Pinus nigra* (9%) *Quercus ilex* (3%) *Buxus sempervirens* (4%) *Quercus coccifera* (8%) *Genistas scorpius* (10%) Gramíneas (6%) *Juniperus* (6%).
- La categoría H está compuesta por el incendio nº 11 (tabla 16), presente en los datos de campos cuyos valores en los E1-2 son de (0%) y E4-5 de (101%). La vegetación localizada en este incendio (tabla 7) fue *Pinus halepensis* (0.1%) *Quercus coccifera* (25%) *Genistas scorpius* (6%) Gramíneas (18%) *Juniperus* (6%).
- La categoría I engloba al incendio nº 5 (tabla 16). Analizando a los datos de campo (tabla 9), se observa que este incendio presenta valores porcentuales medios en los E1-2 de 21.5 y en los E4-5 de 100. De igual modo, la vegetación que conforma la zona afectada por este incendio es: *Pinus halepensis* (10%), *Quercus ilex* (0.71%), *Genistas scorpius* (4%), Gramíneas (35%) y finalmente *Rosa sp.* (1%).

M1 (R20)								
Agrupaciones según Bonferroni								
(Nº)	Medias LS(PROMEDIO)	Grupos o categorías						
14	0,534	A						
5	0,449		B					
9	0,445		B					
8	0,430		B	C				
12	0,403			C	D			
4	0,397				D			
10	0,394				D			
2	0,393				D			
6	0,382				D	E		
3	0,374				D	E		
7	0,353					E	F	
1	0,327						F	G
11	0,310							G
13	0,306							G
15	0,301							G

Tabla 15. Agrupaciones por parares de los incendios en R20 a través del método Bonferroni para M1



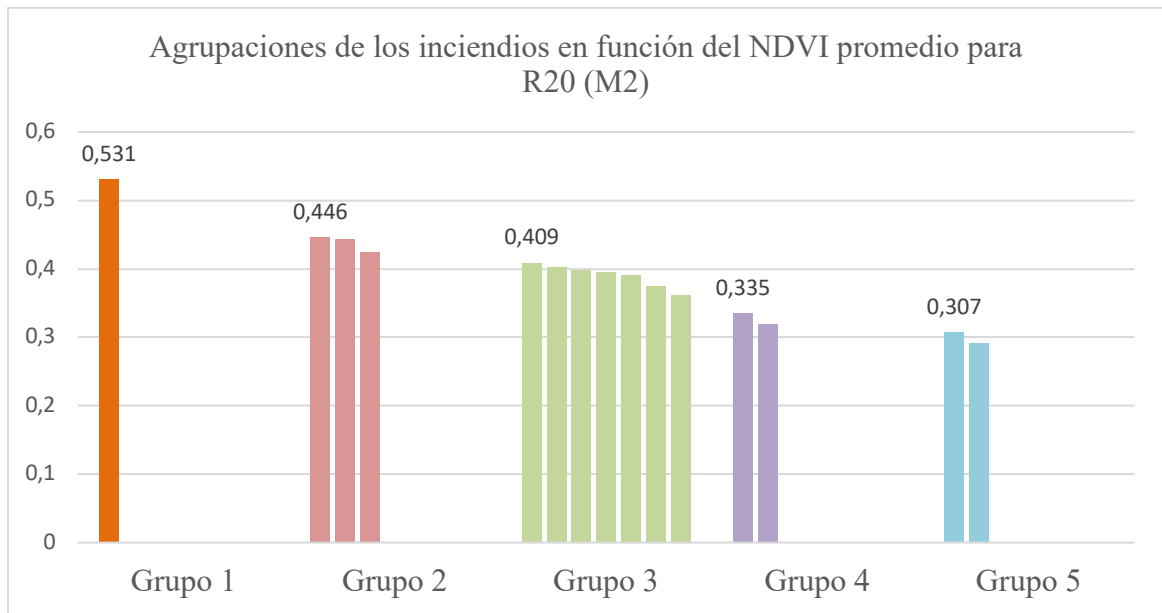
Grupos de incendios establecidos con los valores promedios de NDVI para R20 (M1)

Grupo 1; 14 Grupo 2; 5, 9 y 8 Grupo 3; 12, 4, 10, 2, 6 y 3 Grupo 4; 7 y 1 Grupo 5; 11, 13 y 15

Figura 8. Agrupaciones de los incendios en función de los valores promedios de NDVI para R20 (M1)

M2 (R20)										
Agrupaciones según Bonferroni										
(Nº)	Medias LS(PROMEDIO)	Grupos o categorías								
14	0,531	A								
5	0,446		B							
9	0,444		B							
8	0,425		B	C						
12	0,409			C	D					
2	0,402			C	D	E				
4	0,398			C	D	E				
10	0,396				D	E				
6	0,391				D	E				
3	0,374					E	F			
7	0,361						F	G		
1	0,335							G	H	
11	0,320								H	
13	0,307								H	I
15	0,291									I

Tabla 16. Agrupaciones por pares de los incendios en R20 a través del método Bonferroni para M2



Grupos de incendios establecidos con los valores promedios de NDVI para R20 (M2)
 Grupo 1; 14 Grupo 2; 5, 9 y 8 Grupo 3; 12, 4, 10, 2, 6, 3 y 7 Grupo 4; 1 y 11 Grupo 5; 13 y 15

Figura 9. Agrupaciones de los incendios en función de los valores promedios de NDVI para R20 (M2)

En este muestreo destacan los incendios 2 y 4 por poder agruparse en tres categorías diferentes (C, D y E) (tabla 16) siendo estos los más promiscuos de todo el muestreo. Observando los datos de vegetación de la tabla 7, su reparto en cuanto a cubierta son muy similares entre las distintas especies por lo que no queda marcado su perfil de vegetación. Presentando un tipo de perfil más acorde al arbóreo, aunque con gran presencia también de las especies herbáceas.

5.5 Diferencias entre R10 y R20 y Tipología de Incendios

Analizando lo expuesto en los apartados precedentes se han identificado altos coeficientes de correlación (r^2) en los valores de NDVI de cada incendio, independientemente del muestreo o de la resolución que se emplee (tabla 17). Además, las diferentes agrupaciones entre incendios identificadas mediante el test de *Bonferroni*, se mantienen, en líneas generales, en los dos tipos de resolución; M1-R10 es similar a M2-R20 (tabla 11) y M1-R20 es similar a M2-R10 (tabla 15).

Así pues, se deduce que la resolución espacial de las imágenes Sentinel-2 no afecta al resultado final de los índices de vegetación a pesar de que, además de las posibles diferencias en términos de superficie, las bandas utilizadas para una y otra resolución también son

diferentes. Recordemos que para R10, el cálculo del NDVI opera con los 842 y 665 nm, mientras que para R20 se utilizan las bandas 8a y 5 (865 y 705 nm).

Variables	(R10) (M1)_ prom	(R10) (M2)_ prom	(R10) (M1)_ ds	(R10) (M2)_ ds	(R20) (M1)_pr om	(R20) (M2)_pr om	(R20) (M1)_ ds
(R10)(M1) prom	1						
(R10)(M2) prom	0,97	1					
(R10)(M1) ds	-	-	1				
(R10)(M2) ds	-	-	0,93	1			
(R20)(M1) prom	0,88	0,83	-	-	1		
(R20)(M2) prom	0,96	0,92	-	-	0,928	1	
(R20)(M1) ds	-	-	0,72	0,75	-	-	1
(R20)(M2) ds	-	-	0,85	0,86	-	-	0,87

Tabla 17. Distribución de los coeficientes de dispersión (r^2) entre los valores promedio (prom.) y desviación estándar (ds) en función de la resolución y el muestreo

En relación con la tipología de incendios a partir de la aplicación de *Bonferroni* sobre el promedio de los valores de NDVI de 2017, se ha realizado una síntesis de las cuatro combinaciones (M1-R10; M2-R10; M1-R20; M2-R20), destacando los siguientes grupos de incendios:

1. El grupo con los **valores más elevados de NDVI (~0,445)** (B/C M1-R20) integra tres incendios (Caldearenas 1986, y los incendios de Nueno 1986). Estos incendios se extienden en la mayor parte de su superficie en umbrías (Pacos) y presentan también homogeneidad en el número de años transcurridos tras el fuego.
2. Los incendios de Zuera 1995, las Peñas de Riglos 2001, Nueno-Arguis 1986, Bailo-Peñas de Riglos 1994, Caldearenas-Jaca 1986, Las peñas de Riglos 1985, constituyen el grupo más grande y complejo. Presentan **valores intermedios de NDVI (~0,385)** y reúne hasta seis incendios de muy variable superficie y antigüedad (2001-1985). Este grupo integran tanto comunidades submediterráneas de pinares, quejigares y matorrales mixtos dominados por *Buxus sempervirens*, como pinares de *Pinus halepensis* propios de ambientes fuera del ámbito serrano prepirenaico.

La figura 10 representa las características fisionómicas de la vegetación colonizadora en diferentes puntos de los incendios del grupo 2. Se advierte una clara descompensación en la distribución de la vegetación por estrato. En la pirámide observamos el desequilibrio de los estratos superiores, en el sentido de que no encontramos vegetación en el estrato 1 y, en cambio, encontramos

un estrato 2 mucho más desarrollado en las zonas quemadas. También se reconoce un menor desarrollo de los estratos inferiores y una gran recuperación del estrato 3 acorde con la gran representación de este estrato en las zonas control.

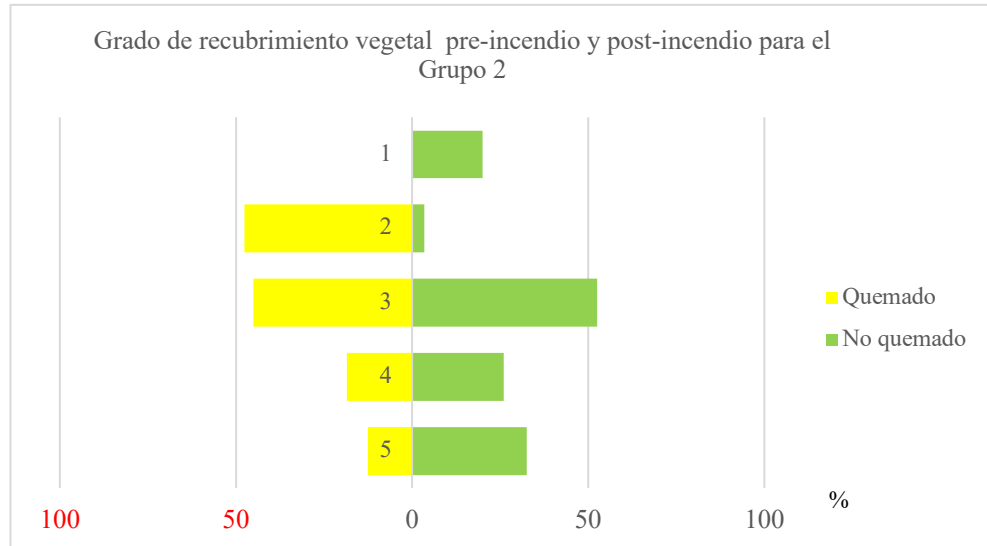


Figura 10. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio para el Grupo 2 en el incendio

- Las Peñas de Riglos 1985, Caldearenas –Jaca 1986 y Nueno-Sabiñanigo 1986 integran un grupo (correspondencia con el grupo E M1-R20) con **valores de NDVI intermedios (~0,375)**. Aunque, desde el punto de vista estadístico podrían incluirse en el anterior, se han individualizado como grupo debido a la gran homogeneidad que presentan en relación con el año del fuego y las comunidades afectadas, todos ellos pinares de *Pinus sylvestris* distribuidos a lo largo de las Sierras prepirenaicas.

La figura 11 representa las características fisionómicas de la vegetación colonizadora en diferentes localizaciones de los incendios del grupo 3. Se observa la escasa recuperación de la vegetación, con una nula recuperación de los estratos 1 y 2 (arbóreos), a pesar de la también poca importancia que presentan estos estratos en las zonas control. La mayor regeneración se registra en el estrato 5, superando incluso a las zonas control. Mientras, los estratos subarbutivos, aunque representados en las zonas quemadas, no muestran un gran desarrollo.

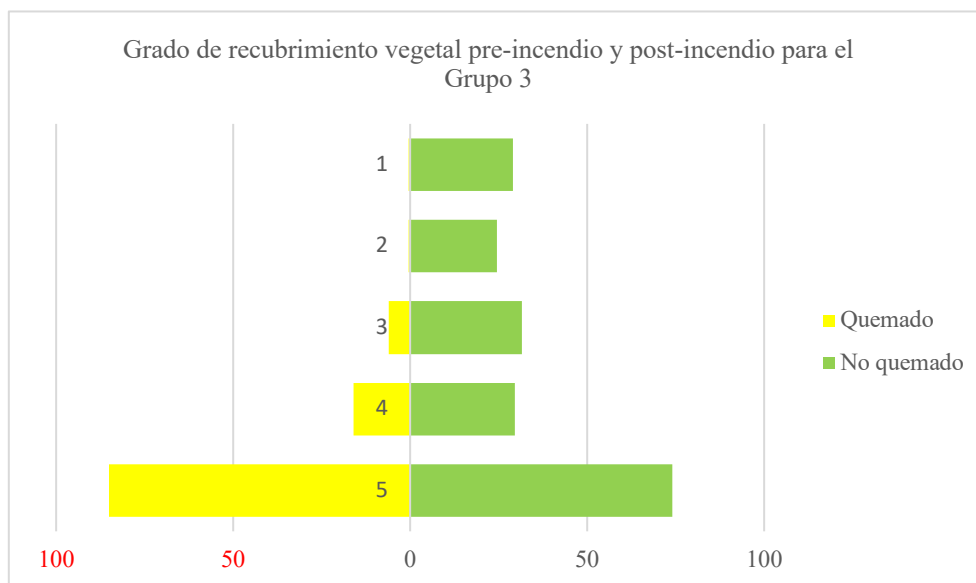


Figura 11. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio para el Grupo 3 en los incendios N° 4 y 6

4. El segundo grupo más numeroso lo integran incendios caracterizados por presentar los **valores más bajos de NDVI (<0,330)**. Se trata de los incendios de Sos del Rey Católico 1994, Zuera 2008, 2006 y Épila—Niguella 1994. En este caso los bajos valores de NDVI se relacionan tanto con el menor tiempo que ha transcurrido desde el fuego (incendios de 2008- 2006), como con la menor capacidad de regeneración, caso de los incendios de 1994 de Sos y Epila.

En la figura 12 representa las características fisionómicas de la vegetación colonizadora en diferentes puntos de los incendios del grupo 4. En ésta, al igual que en la figura 11 el estrato mejor recuperado es el estrato 5. Existe una leve diferencia con la figura 11, pues los valores porcentuales de los estratos menores pre-incendio son ligeramente mayores. De la misma manera, en las zonas quemadas a penas encontramos vegetación en los estratos superiores.

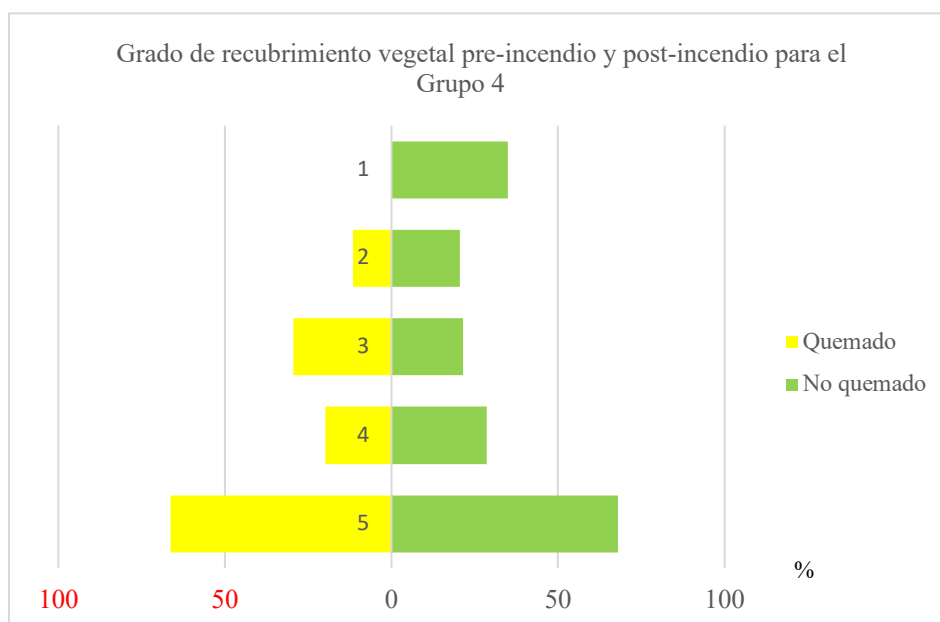


Figura 12. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio para el Grupo 4 en los incendios N° 1, 13 y 15

- Finalmente, el incendio de Zuera de 2008, presenta diferencias significativas con todos los demás incendios debido a las características específicas de éste, espacialmente en cuanto a las comunidades vegetales afectadas (Pinares de carrasco y coscojares), el gran desarrollo de la vegetación de carácter arbóreo y la fecha de fuego.

La figura 13 representa las características fisionómicas de la vegetación colonizadora en diferentes puntos de los incendios del grupo 5. La regeneración de los estratos inferiores ha alcanzado plenamente los valores previos al fuego, en cambios en los estratos superiores no encontramos signos de recuperación, lo que contrasta con el gran desarrollo de estos estratos, sobre todo del arbóreo, en las zonas control. En este caso parece que, el menor periodo de tiempo transcurrido tras el fuego podría explicar la falta de representación en los estratos superiores, toda vez que, desde el punto de vista de la composición florística, en las zonas quemadas *Pinus halepensis* es la especie más representativa.

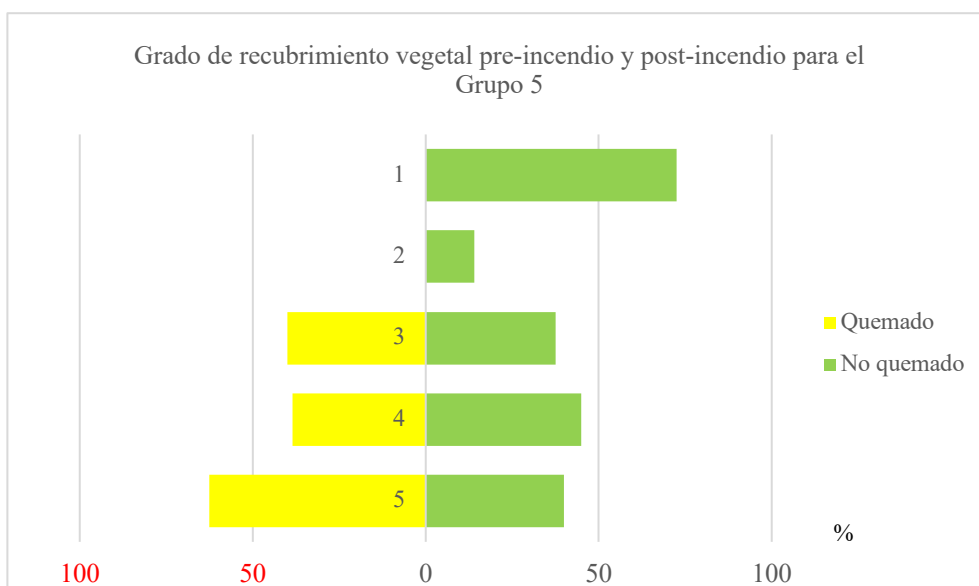


Figura 13. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio para el Grupo 5 para el incendio N°14

5.6 Agregaciones en función de la variación fenológica (mayo-septiembre) en los valores de NDVI y NBR

Se presenta en un 1^{er} subapartado el resultado de un proceso de agregación de los incendios en función del tipo de tendencia que presentan los valores medios de NDVI, siguiendo criterios de carácter visual, acompañando de lecturas sobre la composición florística y la estructura de la vegetación extraída de los datos de campo.

En 2^o lugar se recogen los resultados de los procesos de agregación de superficies quemadas, en este caso utilizando valores de NDVI y NBR y dos procesos estadísticos diferentes: agrupación no jerárquica de las observaciones (*K-means*) y jerarquía (árboles de decisión). El objetivo de formular estos ejercicios de agregación no es otro que el de comprobar si los valores de NDVI y NBR (criterios espectrales) presentan diferencias en función de las características de los incendios. La hipótesis de partida es que cada incendio presenta ciertas particularidades en relación a las magnitudes y distribución de los valores de NDVI/NBR que los diferencia del resto, aunque pueden darse conflictos en incendios que presentan cierta similitud en relación con el año del incendio, las características geográficas, etc.

5.6.1 Análisis visual de las tendencias (mayo-septiembre) a partir de los valores de NDVI.

La figura 14 representa la variación de los valores de NDVI en el periodo comprendido entre mayo y septiembre 2017 representativa de los cambios fenológicos de la vegetación que coloniza las superficies quemadas, en este caso correspondiente a los incendios de Sos del Rey católico (1), Zuera 2008 (11) y Zuera 2006 (13). Como se puede observar, hay una marcada tendencia decreciente desde mayo hasta agosto como consecuencia del agostamiento que experimenta la vegetación en la que el sustrato herbáceo, en función de los datos de campo extraídos, es muy destacado (*Gramíneas* 25%) (Tabla 7). Sin embargo, dicha presencia de herbáceas no es están destacada en el incendio de Sos del Rey Católico (<10%), donde hay una gran variedad de especies leñosas (*Pinus halepensis*, *Quercus ilex*, *Quercus coccifera*, *Genistas scorpius*), por lo que dicho descenso estaría explicado por otros factores o, en su defecto, al hecho de que el punto de muestreo no sea suficientemente representativo del total del área afectada por el fuego.

En la figura 15 se recoge la variación en los valores de NDVI que experimenta la vegetación en los incendios que afectaron al municipio de Nueno en 1986. En ellos existe una marca tendencia decreciente desde mes de mayo a junio, a lo que sigue una rápida recuperación en julio, manteniéndose de manera general hasta septiembre. En este caso, el único punto de muestreo que se posee se corresponde con el incendio 7 (tabla 7) donde la vegetación predominante está compuesta por *Buxus sempervirens* (8%) y diferentes especies de rosáceas (20%), resultando compleja la interpretación relacionada con el súbito descenso de los valores de NDVI que se recogen en junio.

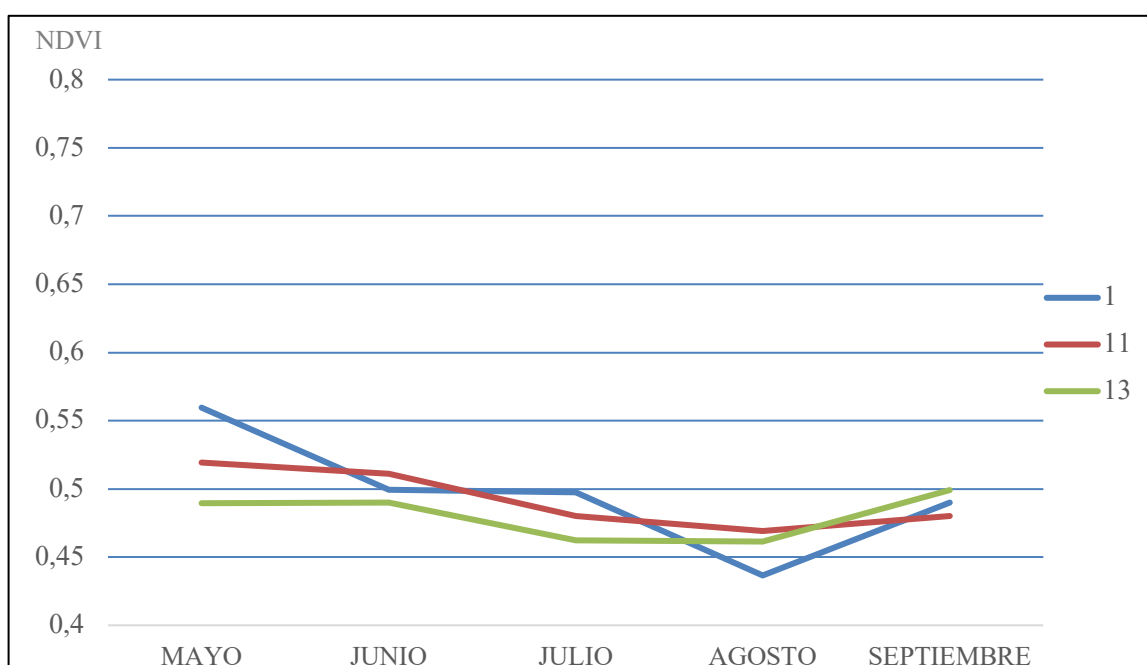


Figura 14. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de Zuera 2008 (11), Zuera 2006 (13) y Sos Del Rey Católico 1994 (1)

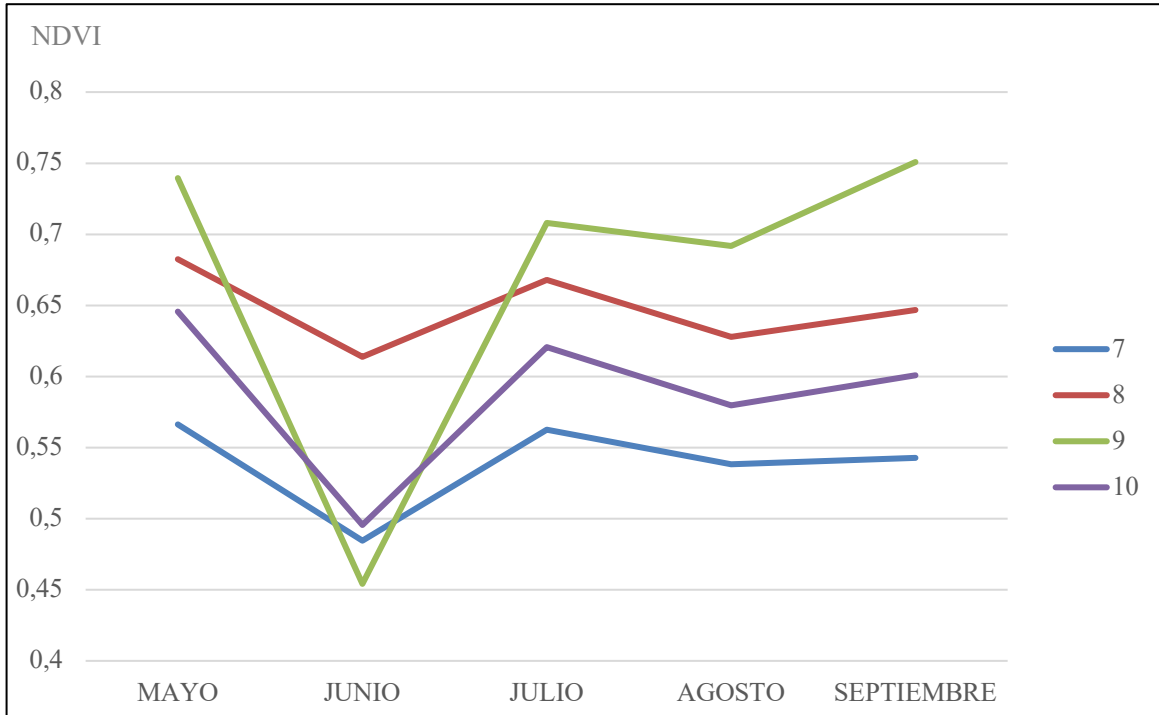


Figura 15. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de Nueno 1986 (7, 8, 9 y 10)

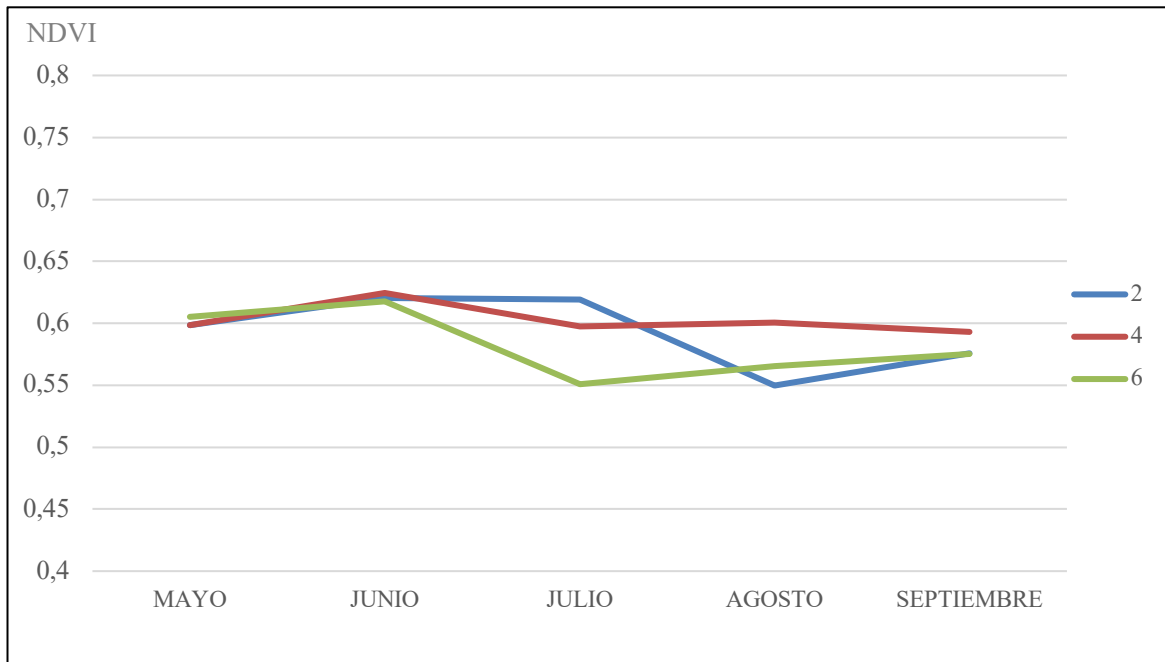


Figura 16. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de a Bailo 1994 (2) y Las Peñas de Riglos 1985 (4 y 6)

La agrupación de los incendios que refleja la figura 16, se caracteriza por tener un repunte de los valores de NDVI desde el mes de mayo a junio. Después de este incremento se produce una tendencia decreciente en todos los incendios hasta septiembre, con algunas variaciones en el mes de agosto. En este caso los datos de vegetación registrados en el incendio 2 y 4 (tabla 11) indican una gran variedad en la vegetación aunque es muy abundante la presencia de gramíneas.

En la figura 17 se representa la trayectoria de los valores de NDVI correspondiente a los incendios que afectaron al municipio de Caldearenas en 1986. Ambos presentan tendencias similares, mostrando una escasa variación a lo largo del periodo mayo-septiembre, aunque magnitudes contrastadas entre los dos. De este modo, la superficie correspondiente al incendio con el código 3 presenta niveles más bajos d NDVI.

Atendiendo a los datos de vegetación (tabla 7), el incendio nº 3 posee porcentajes altos de vegetación herbácea (20%) y un gran desarrollo de la vegetación arbustiva representada especialmente con *Genistas scorpius* (20), lo que podría explicar los bajos valores de NDVI y la ligera tendencia decreciente a partir del mes de agosto. Por el contrario, el incendio nº5, presenta un importante estrato arbóreo dominando *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra* y *Quercus ilex* (4) sobre una también importante presencia de gramíneas y estrato de *Genista scorpius* (tabla 7).

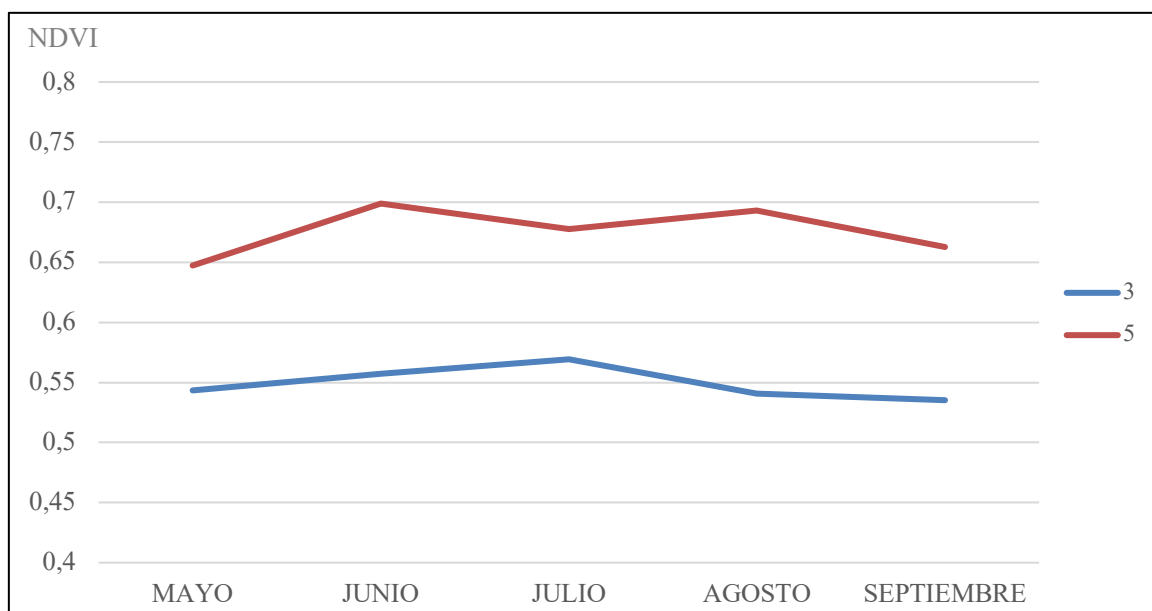


Figura 17. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de Caldearenas 1986 (3 y 5)

Finalmente, en la figura 18 aparece representada la variabilidad de los valores de NDVI correspondiente a los incendios 14 y 15 (Zuera y Épila-Niguella). El incendio de Zuera, se sitúa en la localización muy específica, próxima a zonas de vegetación de ribera, en la que destacan los altos niveles de regeneración debido al carácter higrófilo de este sector. El incendio de Épila por su parte, presenta una tendencia regresiva, propia del proceso de estrés hídrico que experimenta la vegetación herbácea de este sector (*Gramíneas* ~30%).

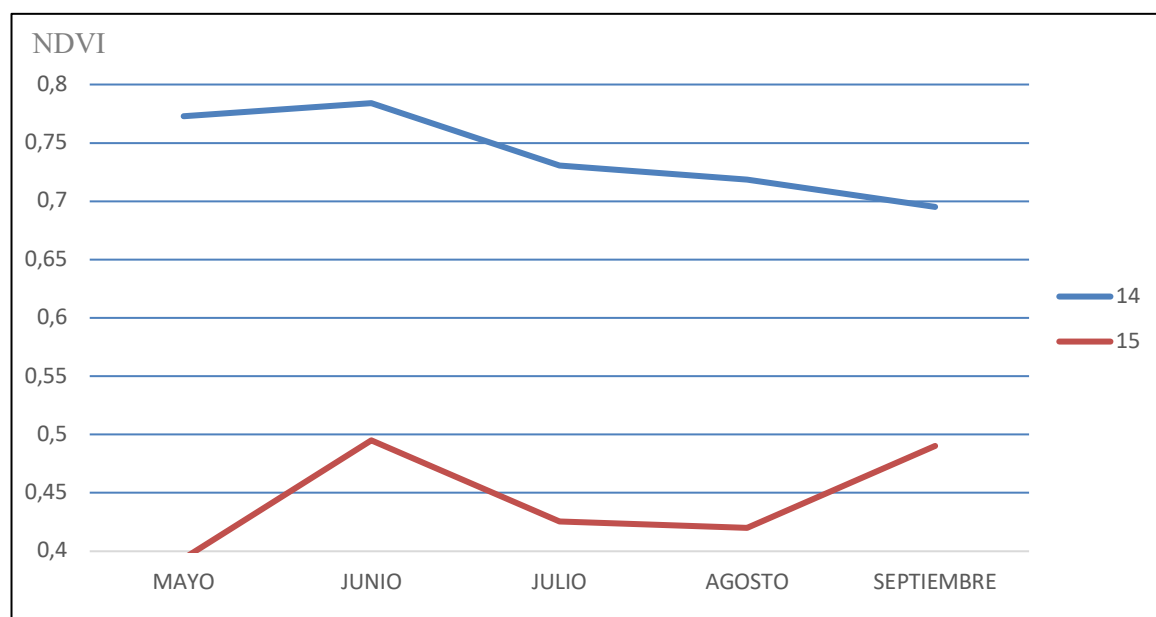


Figura 18. Variación mensual de los valores de NDVI correspondiente a los incendios de Épila 1994 (15) y Zuera 2008 (14)

5.6.2 Agrupación no jerárquica de las observaciones en función de la variación fenológica (mayo-septiembre) en los valores de NDVI y NBR

La tabla 18 recoge los resultados principales del análisis clúster *k-means*. Por su parte, la tabla 19 presenta la matriz de confusión, en porcentajes, en la que se identifican las correspondencias entre los píxeles pertenecientes a cada incendio y las agrupaciones de la función no jerárquica.

Tal y como se percibe según esta segunda, no existe una clara correspondencia entre los clústeres identificados por el algoritmo *K-means* (criterio Wilks' Lambda) y las agrupaciones de los píxeles en función de las superficies quemadas a las que pertenecen. Este último extremo puede interpretarse como que los patrones de regeneración son similares entre sí, independientemente del año o de la formación o localización de la zona quemada. Sin embargo, desde un punto de vista más metodológico, también puede ser interpretado como que los índices espectrales contemplados (NBR y NDVI) no son adecuados para identificar las características de los procesos de regeneración al no ser capaces de asociar unos patrones de regeneración específicos en función de las características del fuego.

Incendio por incendio observamos que el 20% de las observaciones (píxeles) correspondientes al incendio de Sos del Rey Católico (Cod. 1) se inscriben en el clúster 3 (C3) caracterizado por presentar valores de NDVI bajos (0,25) y constantes durante el periodo considerado. En un segundo término, con porcentajes ~13%, encontramos los clústeres 6, 9, 1 y 10, estos últimos muy similares entre sí en términos de NDVI, y el 6 y el 9. Todos ellos se caracterizan por mostrar un incremento del NDVI en el junio, que se mantiene durante julio, agosto y septiembre, aunque muestran diferentes magnitudes.

El incendio de Bailo-Peñas de Riglos (Cod. 2) está representando en un 30% por C6 caracterizado, como se comentó para el incendio de Sos del Rey Católico, en un incremento en el mes de junio respecto a mayo para estabilizarse en torno a 0,6. En un segundo orden de magnitud, con porcentajes en torno al 12% tenemos los clústeres 2, 4, 10, que representan itinerarios similares, aunque de diferente magnitud: mientras que en caso de C4 se estabiliza en torno a valores próximos a 0,7, C10 alcanza valores de 0,45.

C1, C2, C4 y C6 aparecen representados en el incendio de Caldearenas (Cod. 3) con porcentajes muy similares entre sí (~18%), lo que significa una buena equi-distribución de diferentes niveles de NDVI en donde el denominador común es el incremento, nuevamente, que se produce entre mayo y junio.

El incendio de Las Peñas de Riglos (Cod. 4) se caracteriza por su inclusión en C4 en un 27%, es decir que casi un tercio de las observaciones experimenta un incremento de 0,4 a 0,65 de mayo a junio, perdurando hasta septiembre. En un segundo orden encontramos las pertenencias a 5 y 6 con un 16% y un 19%, respectivamente que representan ascensos en junio al 0,75 y 0,55 respectivamente

Agrup.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
Observaciones (píxeles)	274	276	116	318	288	354	195	20	229	174	165	188	3
Variación dentro de cada agrup.	0,027	0,016	0,099	0,013	0,018	0,015	0,029	0,072	0,020	0,029	0,035	0,030	0,313
Distancia mínima entre agrup.	0,038	0,043	0,066	0,023	0,046	0,031	0,050	0,078	0,041	0,048	0,052	0,043	0,312
Distancia media entre agrup.	0,148	0,117	0,278	0,106	0,126	0,116	0,159	0,242	0,121	0,156	0,177	0,163	0,435
Distancia máxima entre agrup.	0,713	0,377	1,248	0,276	0,613	0,336	0,323	0,422	0,960	0,410	0,333	0,317	0,627

Tabla 18. Resultados obtenidos del análisis *k-means*

Clúster (C)/Incendio (I)													
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13
C1	14,00	5,00	17,50	2,50	0,50	4,50	7,00	0,00	0,00	0,00	20,00	8,50	57,50
C2	7,00	15,00	19,00	11,50	7,00	13,50	4,00	0,50	0,00	0,00	19,00	7,50	34,00
C3	19,50	2,00	3,50	5,50	0,00	3,50	1,50	0,00	0,00	0,50	15,50	4,50	2,00
C4	8,00	12,00	17,00	27,00	24,50	28,50	6,00	11,00	0,00	2,00	9,50	12,00	1,50
C5	8,00	8,50	9,50	16,50	28,50	6,00	6,00	28,00	0,00	5,00	5,00	22,00	1,00
C6	15,50	29,50	19,50	19,00	16,00	22,00	10,50	10,00	0,00	4,00	15,50	11,50	4,00
C7	3,50	7,50	3,00	9,00	18,00	6,50	5,00	4,00	16,00	4,00	0,50	20,50	0,00
C8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50	6,50	0,00
C9	13,00	9,00	5,50	4,50	4,00	7,50	8,50	33,00	0,00	25,50	1,50	2,50	0,00
C10	11,00	11,50	5,50	4,50	1,50	6,50	20,50	5,00	1,00	6,00	9,50	4,50	0,00
C11	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,50	8,00	11,50	36,50	0,50	0,00	0,00
C12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,50	0,50	71,50	16,50	0,00	0,00	0,00
C13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 19. Matriz de confusión en porcentajes entre los píxeles de cada incendio

En el incendio de Caldearenas (Bco. del río Moro) (Cod. 5), los clústeres 4 y 5 son los dominantes al representar juntos más del 50%. Sin embargo, los valores de NDVI son diferentes entre sí: 0,75 y 0,55. En Las Peñas de Riglos (Cod. 6) el incremento es menor al estar representado por C4 y C6. Nueno-Sabiñánigo presenta sus observaciones básicamente en C10 y C11 caracterizados por bajos valores (en torno a 0.5) y en el caso de C11 por sufrir un periodo de incremento más lento prolongándose hasta julio. Nueno (Paco Aliana) está representado en más del 60% por C5 y C9, con valores de NDVI de 0,75 y 0,70, respectivamente. Se trata de niveles de regeneración muy elevados. Nueno (Valleclusa) (cod 9) está casi mono representado por C12 que representa altos niveles de recuperación (0,75) pero con un retrato del incremento del NDVI al mes de julio. Nueno-Arguis (cod 10) está representando por C9 (25%) y especialmente por C11 con un 36,5% de las observaciones. Esta última se corresponde con un regenerado medio bajo 0,55 que experimenta un cierto retraso. Al mismo tiempo participa en un 25% de C9 característico de niveles de regeneración que alcanzan el 0,70.

En el incendio de Zuera de 2008, en torno al 40% presenta niveles de crecimiento de 0,50. Un 15% se incluye en C6 con niveles de crecimiento superiores (0,60) y otro 15% presenta niveles muy bajos 0,25 que además son estables durante todo el periodo de tiempo analizado.

5.6.3 Agrupación jerárquica (*Classification tree*) de las observaciones en función de la variación fenológica (mayo-septiembre) en los valores de NDVI y NBR.

Los únicos incendios en los que existe una buena correspondencia, como también se observó mediante *K-means* se corresponden con los códigos 9 y 13 (Nueno, Zuera). Son incendios de dimensiones reducidas y, por tanto, en los que hay mayor probabilidad de

homogeneidad en el patrón de regeneración. Sin embargo, no en todos los incendios de dimensiones reducidas ocurre este extremo. Por ejemplo, en el caso del incendio de los Las Peñas de Riglos (Cod.6) el porcentaje de observaciones bien clasificadas tan solo es del 17% en el que encontramos una gran cantidad de observaciones que han sido incluidas en incendios más recientes o de dimensiones dispares. Los incendios de Zuera de 2008 y Nueno (Cod.11 y 8, respectivamente), registran los niveles de clasificación más bajos <2,5%. En el caso de Zuera, la mayoría de las observaciones han sido clasificadas en otro incendio de Zuera (Cod. 13) lo cual se puede interpretar como un mismo patrón de regeneración; además son zonas muy próximas entre sí. En el incendio de Nueno, la mayoría de las observaciones han sido clasificadas en el incendio de Nueno (Valleclusa), cuya localización también se sitúa muy próxima. C1, 4, 5 y 7 presentan porcentajes en torno al 30%. Excepto en el caso de C1 se trata de incendios de mediados de los ochenta.

La tabla 21 recoge los principales nodos ($p\text{-value} > 1$) de la estructura de más de 60 elementos del árbol de clasificación identificado. Como se puede observar los primeros nodos básicamente utilizan los valores de NBR y NDVI correspondientes al mes de junio para hacer las diferentes categorías.

Clúster (C)/Incendio (I)													
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13
C1	27,00	7,50	6,00	6,50	8,50	12,00	5,00	10,00	0,00	6,50	4,00	5,50	0,00
C2	6,50	18,50	7,00	1,50	1,50	0,00	1,50	6,50	0,00	0,50	0,50	1,00	0,50
C3	0,00	0,00	3,50	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C4	4,00	5,00	13,00	32,50	18,00	15,00	3,50	0,00	0,00	0,00	23,50	13,00	10,00
C5	3,00	6,00	10,00	19,00	31,00	16,00	1,50	0,50	0,00	0,00	5,00	17,50	0,50
C6	2,00	3,50	0,00	5,50	4,00	17,00	1,50	5,50	0,00	0,50	2,00	2,50	0,50
C7	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	31,50	1,00	3,00	5,00	1,00	0,00	0,00
C8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C9	9,00	14,50	7,50	14,00	24,50	9,00	10,00	59,50	91,00	44,00	1,00	24,00	0,00
C10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,50	14,50	6,00	41,50	0,00	0,00	0,00
C11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	1,00	0,00
C12	0,00	0,00	0,00	0,50	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	8,50	0,00
C13	48,00	44,50	52,50	20,50	10,50	31,00	32,00	2,50	0,00	2,00	60,00	27,00	88,50

Tabla 20. Agrupación jerárquica *Classification tree* en función de la varianza fenológica

<i>Node</i>	<i>p-value</i>	<i>Objects</i>	<i>%</i>	<i>Split variable</i>	<i>Values</i>	<i>Purity</i>
1	1576,894	2600	100,00%			7,69%
3	726,929	709	27,27%	NBR JUN	[0,379; 0,492[	15,23%
2	218,462	1277	49,12%	NBR JUN	[-0,091; 0,379[	15,58%
5	123,683	901	34,65%	NDVI JUN	[0,093; 0,605[	19,64%
38	104,020	351	13,50%	NDVI JUN	[0,603; 0,733[	17,09%
20	100,320	224	8,62%	NDVI JUL	[0,614; 0,734[	19,20%
9	88,737	870	33,46%	NBR JUL	[-0,069; 0,37[	20,34%
54	77,640	250	9,62%	NBR AGOS	[0,355; 0,487[	17,20%
6	72,350	362	13,92%	NDVI JUN	[0,605; 0,738[	19,34%
37	66,782	203	7,81%	NDVI JUN	[0,33; 0,603[	45,81%
4	51,738	614	23,62%	NBR JUN	[0,492; 0,67[	29,32%
39	43,860	136	5,23%	NDVI JUN	[0,733; 0,81[	26,47%
53	43,257	92	3,54%	NBR AGOS	[0,185; 0,355[	26,09%
42	25,710	110	4,23%	NBR AGOS	[0,355; 0,487[	46,36%
19	13,068	133	5,12%	NDVI JUL	[0,493; 0,614[	20,30%
43	11,123	19	0,73%	NBR AGOS	[0,487; 0,566[	47,37%
55	11,090	8	0,31%	NBR AGOS	[0,487; 0,579[	50,00%
10	7,077	27	1,04%	NBR JUL	[0,37; 0,488[	88,89%
7	6,502	10	0,38%	NDVI JUN	[0,738; 0,802[	50,00%
41	5,730	72	2,77%	NBR AGOS	[0,134; 0,355[	45,83%
8	5,545	4	0,15%	NDVI JUN	[0,802; 0,983[	50,00%
21	5,004	5	0,19%	NDVI JUL	[0,734; 0,764[	80,00%
29	4,727	9	0,35%	NDVI MAYO	[0,418; 0,733[	55,56%
40	3,652	19	0,73%	NDVI JUN	[0,81; 0,986[	73,68%
31	2,773	2	0,08%	NDVI MAYO	[0,426; 0,544[	50,00%

Tabla 21. Nodos principales ($p\text{-value}>1$) de la estructura de más de 60 elementos del árbol de clasificación identificado

6. CONCLUSIONES

En relación con los resultados utilizando los diferentes tipos de resolución espacial (R10 y R20), no se han encontrado diferencias significativas a pesar de la también diferente composición espectral utilizadas en el NDVI.

En relación con la tipología de incendios a partir de la aplicación de *Bonferroni* sobre el promedio de los valores de NDVI de 2017, se han identificado cuatro tipos principales de incendios: (1) **Incendios con valores elevados de NDVI (~0,445)** que presentan homogeneidad en el número de años transcurridos tras el fuego y tipo de comunidad afectada; (2) **Incendios con valores intermedios de NDVI (~0,385)**, que reúne hasta seis incendios de muy variable superficie y antigüedad (2001-1985), integrando comunidades sub-mediterráneas de pinares, quejigares y matorrales mixtos dominados por *Buxus sempervirens*, y pinares de *Pinus halepensis* propios de ambientes fuera del ámbito serrano prepirenaico; (3) **Incendios de mediados de la década de los ochenta con valores de NDVI también intermedios (~0,375)** que presentan gran homogeneidad en relación con el año del fuego y las comunidades afectadas, todos ellos pinares de *Pinus sylvestris* distribuidos a lo largo de las Sierras prepirenaicas; (4) **Incendios con valores bajos de NDVI (<0,330)** relacionados con el menor tiempo que ha transcurrido desde el fuego (incendios de la década del 2000) y/o la menor capacidad de regeneración de incendios de la década de los noventa.

La alta heterogeneidad de los clústeres (en términos de participación en los diferentes incendios) identificados por medio del árbol CHAID y el algoritmo *K-means* nos permite concluir que los valores NDVI/NBR y su tendencia estacional, no están dirigidos exclusivamente por la cantidad de años transcurridos tras el fuego o la localización específica de cada incendio. Sin embargo, cada uno de los clústeres puede interpretarse como los tipos de respuesta de la vegetación al fuego que podemos encontrar en las diferentes zonas quemadas. En ese sentido un mismo incendio, concita diferentes tipos de respuesta ante el fuego.

Los patrones espectro-temporales de cada clúster no se corresponden con un determinado tiempo transcurrido tras el fuego, o localización específica, ya que cada incendio muestra, en la mayoría de los casos, varios patrones. Evidentemente, los incendios de mayor tamaño tienen una mayor probabilidad de respuestas, aunque no es condición sine qua non.

Los índices espectrales utilizados muestran ciertas deficiencias a la hora de caracterizar como es la respuesta de la vegetación en términos taxo-fisionómicos, lo que debería ser tenido en cuenta cuando se utilizan con estos fines utilizando series de multitemporales de imágenes.

Para el futuro, sería muy interesante proyectar espacialmente los patrones definidos por los clústeres identificados y realizar un análisis más exhaustivo de campo para comprobar las características de la vegetación en cada uno.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Baret, F.; Guyot, G. (1991): *Potentials and limits of vegetations indices for LAI and APAR assesment*. Remote Sensing Environment 46, págs 213-222.
- Calvo, L., Tarrega, R. y De Luis, E. (2002a): *The dynamics of mediterranean shrubs species over 12 years following perturbations*. Leon : Faculty of Biology, University of León, págs. 25-45
- Calvo, L., Tarrega, R. y De Luis, E. (2002b): *Regeneration patterns in a Calluna vulgaris heathland in the Cantabrian mountains (NW Spain): effects of burning, cutting and ploughin*. Cantabria: Gauthier-Villars, págs. 81-90.
- Chuvieco, E., Giglio, L. and Justice, C. (2008): *Global characterization of fire activity: toward defininf fire regimes from Earth observation data*. s.l. : Global Change Biology, págs. 1488-1502.
- Cuadrat Prats, J.M. (2004): *El clima de Aragón*. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.
- Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P., Jiménez, J. C., Soria, G., Sobrino, J. A., Moreno, J. (2018): *Fire severity estimation in southern of the Buenos Aires province, Argentina, using Sentinel-2 and its comparison with Landsat-8*. Revista de Teledetección, 51, págs. 47-60. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8934>.
- Gitas, I., Mitri, G., Veraverbeke, S. & Polychronaki, A. (2012): *Advances in Remote Sensing of Post-Fire Vegetation Recovery Monitoring-A review*. INTECH Open Access Publisher.
- Gilabert, M.A, Gonzalez-Piqueras, M.A y Garcia-Haro, J. (1997): *Acerca de los índices de vegetación*. Departament de Tennodin3.mica, Facultat de Física, Universitat de Valencia Dr. Moliner, 50 46100 Burjassot. Valencia.
- Guerrero, A., Pineda, L., Palà, V., Corbera, J. (2017): *Severity study in Albinyana (Catalunya) forest fire, using SENTINEL-2 data*. Revista de Teledetección, 49, págs. 115-121. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7105>.
- Huang, B. y Gao, H. (2000): *Root physiological eharacteristics associated with drought resistance in tall feseue cultivars*. Crop Sei. 40, págs. 196 - 203.'
- Fernández-Mano, A (2017): *Estudio de la severidad post-incendio en la comunidad Valenciana comparando los incendios dNBR, RdNBR y RBR a partir de imágenes Landsat 8*. REVISTA DE TELEDETECCIÓN. Asociación Española de Teledetección 49. Número especial, págs. 33-47.
- Fernández-Manso, O., Quintano, C., Fernández-Manso, A., (2009): *Combining spectral mixture analysis and object-based classification for fire severity mapping*. Forest Systems 18, págs. 296-313.
- Jiménez Ruano, A., Pérez-Cabello, F. and Montorio Llovería, R. (2016): *Nivele de LAI/fPAR en superficies afectadas por incendios forestales en Aragón. Análisis mediante el producto MCD15A2 de Modis*. Zaragoza : CSIC.
- Keeley, J.E, Fotheringham, C.J and Morais, M. (1999): *Reexamining fire suppression impacts on brushland fire regimes*. s.l. : Science 284, págs. 1829-1832.
- Landi, M. A., Ojeda, S., Di Bella, C. M., Salvatierra, P., Argañaraz, J. P., Bellis, L. M. (2017): *Control plot selection for studies of post-fire dynamics: performance of non-*

- parametric and autoregressive routines. *Revista de Teledetección*, 49, págs. 79-90.
<https://doi.org/10.4995/raet.2017.7116>.
- L. Hanes, Ted. (1971): *Succession after Fire in the Chaparral of Southern California*. Ecol. Monogr. 41. págs. 27-52.
- Sacristán Romero, F. (2006): *La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental*. Madrid : Revista científica de la Sociedad Española de Acuicultura, Vol. 24.
- Miller, J.D. and Yool, S.R. (2002): *Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Land-sat TM and ETM data*. s.l. : Remote Sensing of Environment, 2002, 82, págs. 481-496.
- Montorio Llovería, R., et al. (2014): *La severidad del fuego: Revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales*. Zaragoza : Instituto Pirenaico de Ecología.
- Mooney, H.A. and Hobbs, R.H. (1986): *Resilience at the individual plant level*. [book auth.] D., Hopkins, A.J. In: Dell and B.B Lamont. s.l. : Resilience in Mediterranean type ecosystems, págs. 65-82.
- Paniagua, A. (1992). *La población agraria española. Análisis estructural: evolución y perspectivas*. Valencia : Revista Valenciana d'Estudis Autònoms, Vol. 14, págs. 247-275.
- Pausas, J.G. (2004): La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo. Valencia : Fundación CEAM, págs. 47-64.
- Pausas, J.G. (2004). *Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin)*. Climatic Change 63, págs. 337-350.
- Peña, J.L and Lozano, M.V. (2004): *Las unidades del relieve Aragonés*. Zaragoza : Geografía Física de Aragón: Aspectos generales y temáticos.
- Pérez-Cabello F., (2002): Paisajes forestales y fuego en el Prepirineo occidental oscense. Un modelo regional de reconstrucción ambiental. Serie Investigación 33. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, págs 358.
- Piacere, A. (1987). *Evolution de l'élevage caprin en Provence du XIXème siècle à nos jours*. La Forêt et l'Élevage en Région Méditerranéenne Française. Fourrages número especial, págs 37-42.
- Rock, B. N., D. L. Williams, J. E. Vogelmann, (1985): *Field and airborne spectral characterization of suspected acid deposition damage in red spruce (Picea rubens) from Vermont*. Proc., Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data Purdue Univ, West Lafayette, Indiana, págs 71-81.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. (1974): *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. In: Fraden S.C., Marcanti E.P. & Becker M.A. (eds), Third ERTS1 Symposium, 10-14 Dec. 1973, NASA SP-351, Washington D.C. NASA, págs 309-317.
- Ruíz de la Torre, J. (1990a): Mapa forestal de Espa-a. Escala 1:200.000. Hoja 8-3. Huesca. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Third ERTS1 Symposium, 10-14 Dec. 1973, NASA SP-351, Washington D.C. NASA, pp.309-317.
- Tejedor Tejedor, Francisco J. (1999): *ANÁLISIS DE LA VARIANZA*. Madrid : LA MURALLA, S.A., pág. 18.

ENLACES DE INTERES

- <http://luciovilla.blogspot.com/2017/05/sentinel-2-la-revolucion-de-la.html>

8. ANEXO

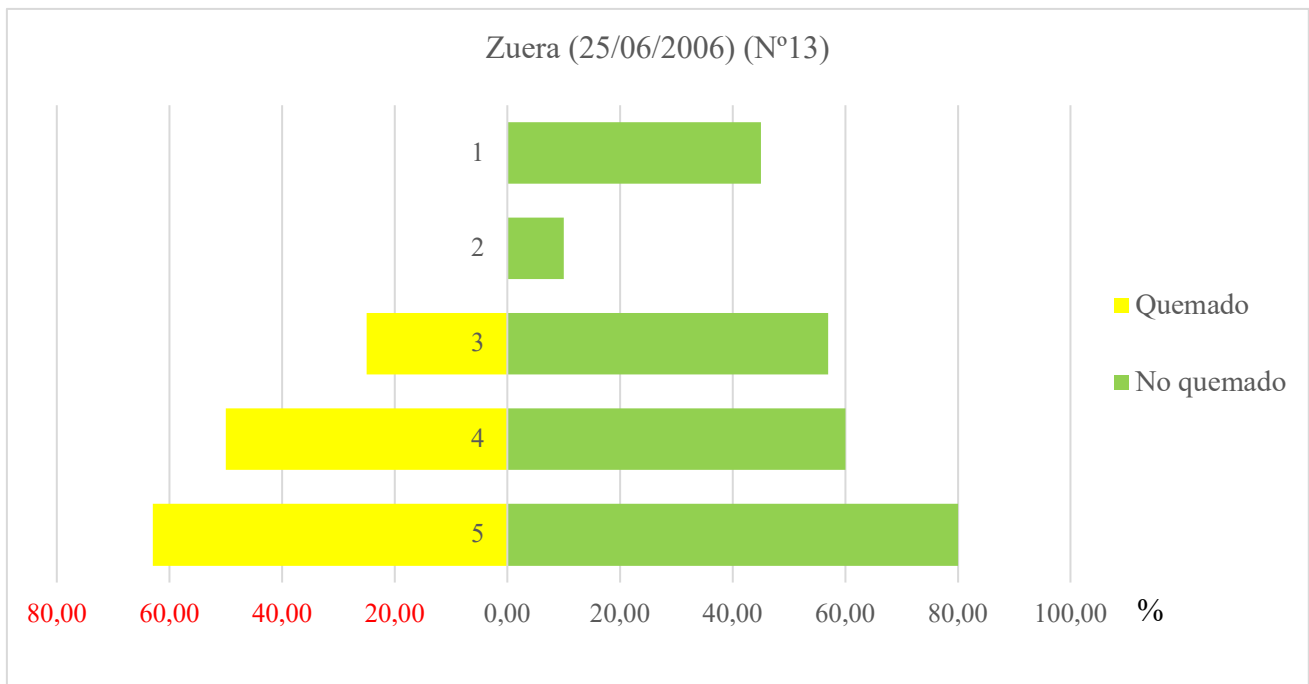


Figura 19. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (25/06/2006) (N°13)

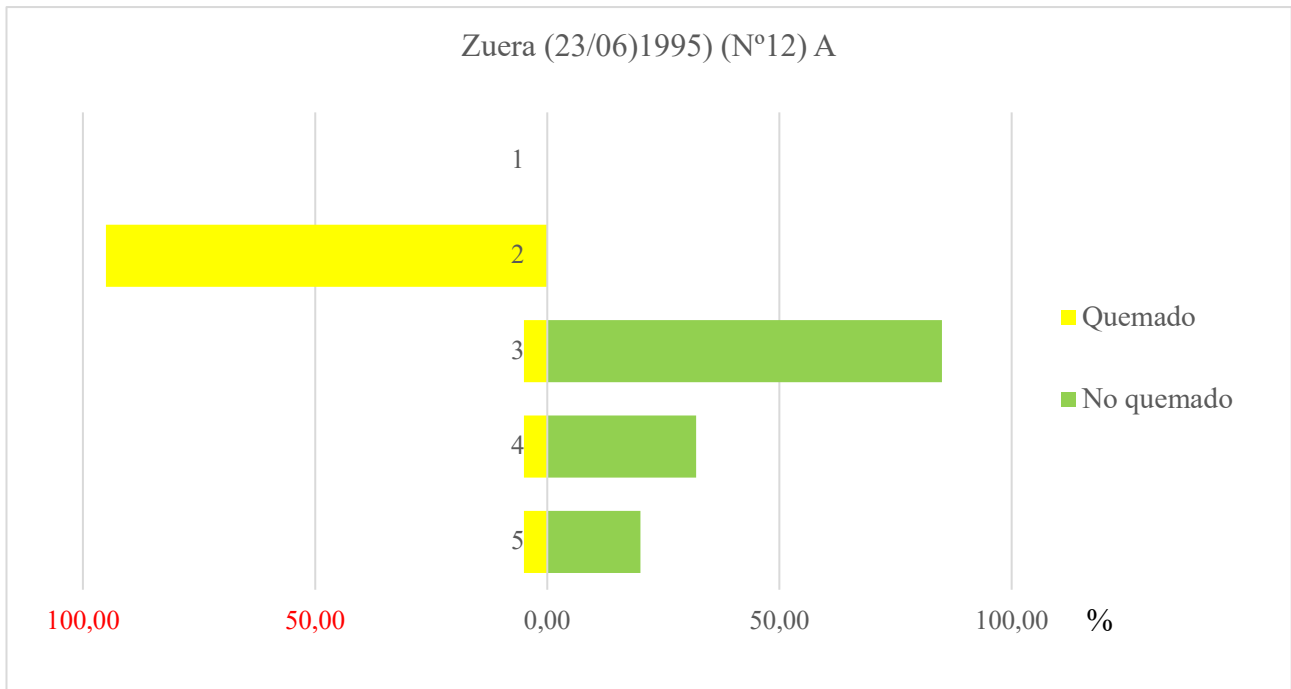


Figura 20. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (23/06/2006) (Nª12), A

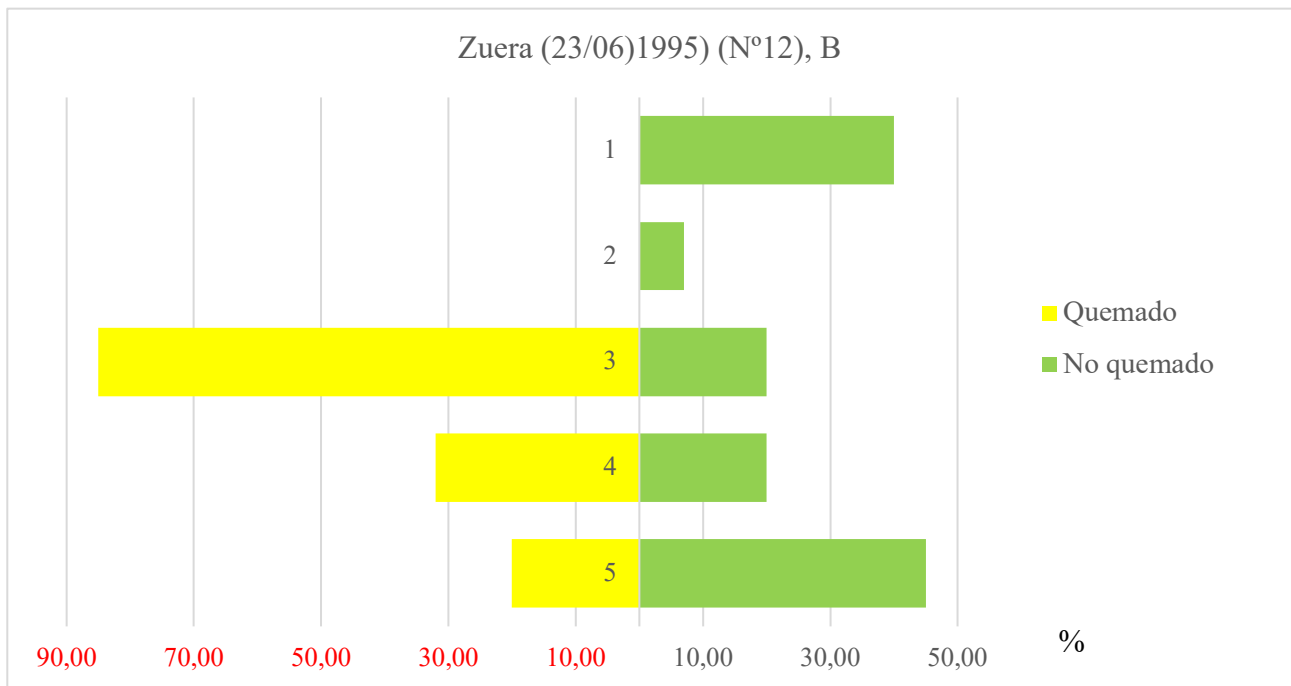


Figura 21. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (23/06/2006) (Nª12), B

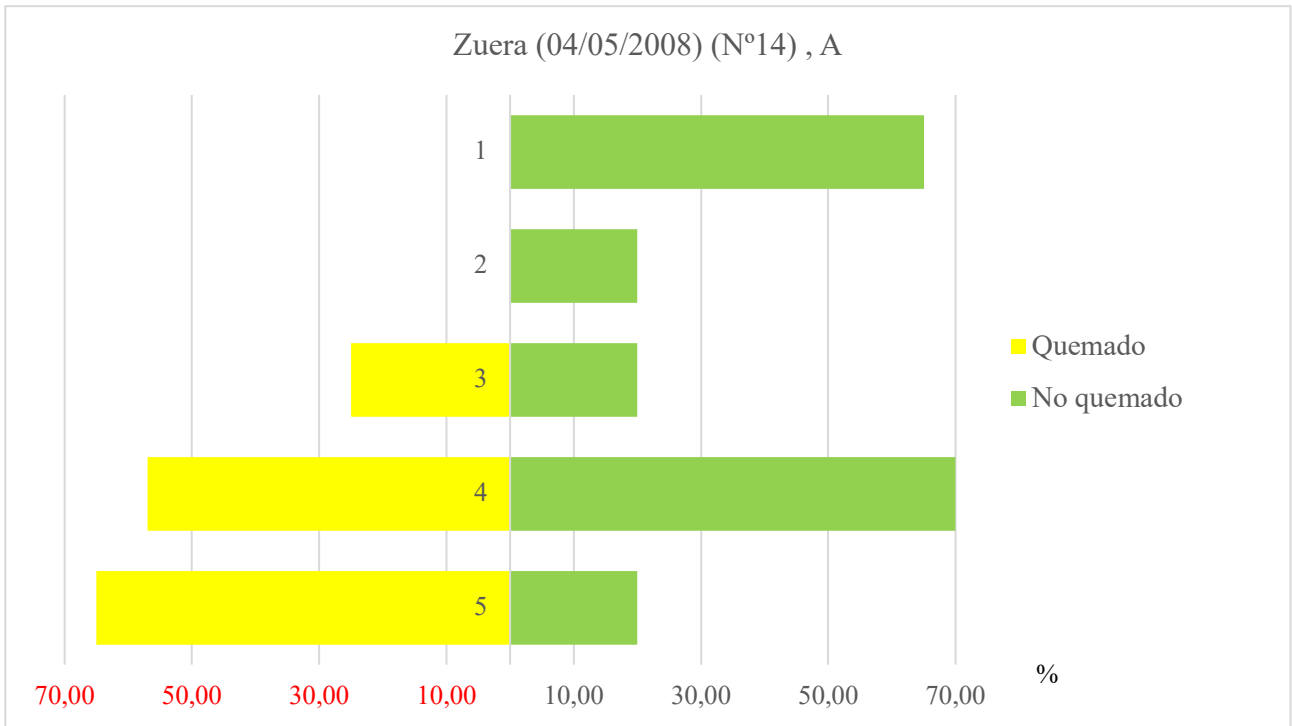


Figura 22. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (04/05/2008) (Nª14), A

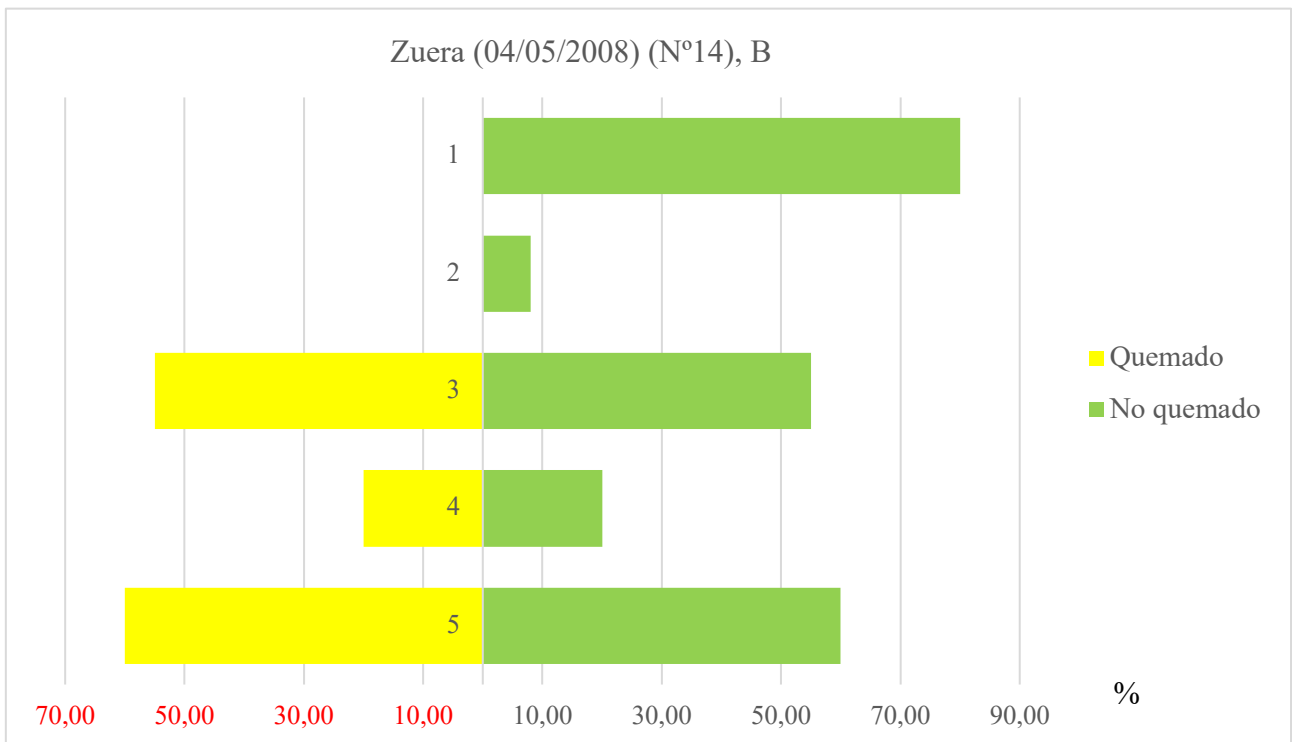


Figura 23. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Zuera (04/05/2008) (Nª14), B

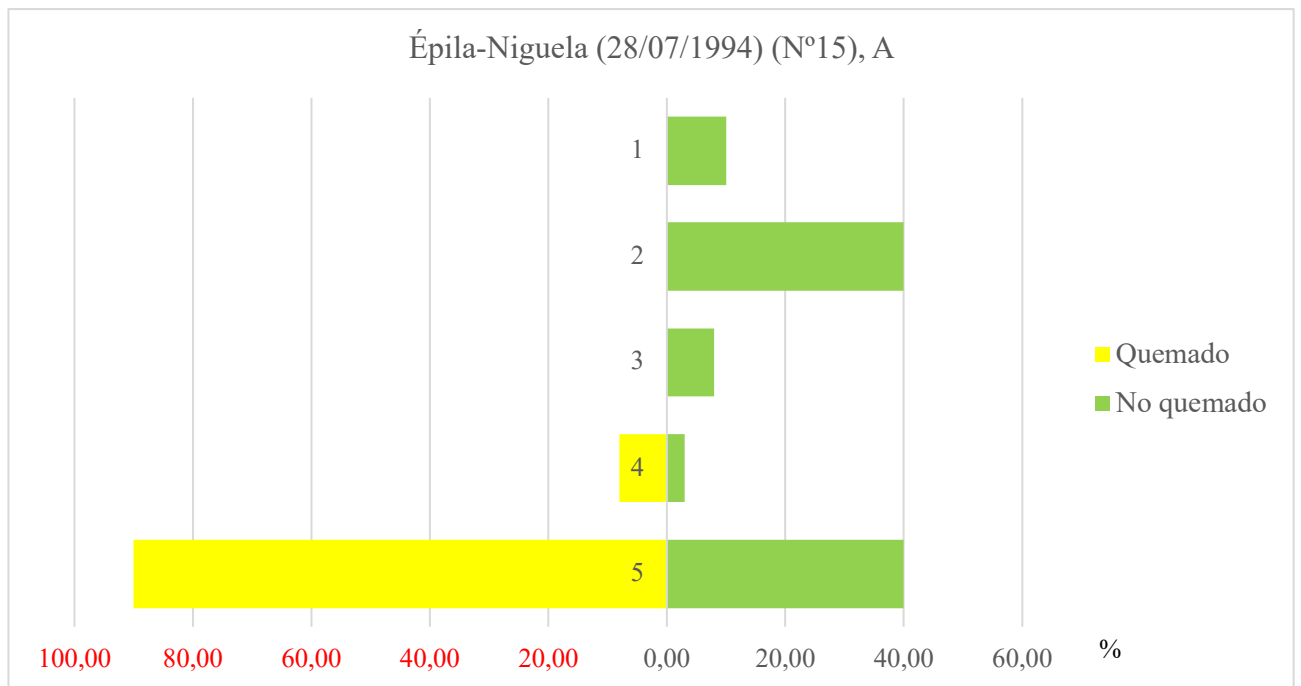


Figura 24. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Épila-Niguela (28/07/1994) (N°15), A

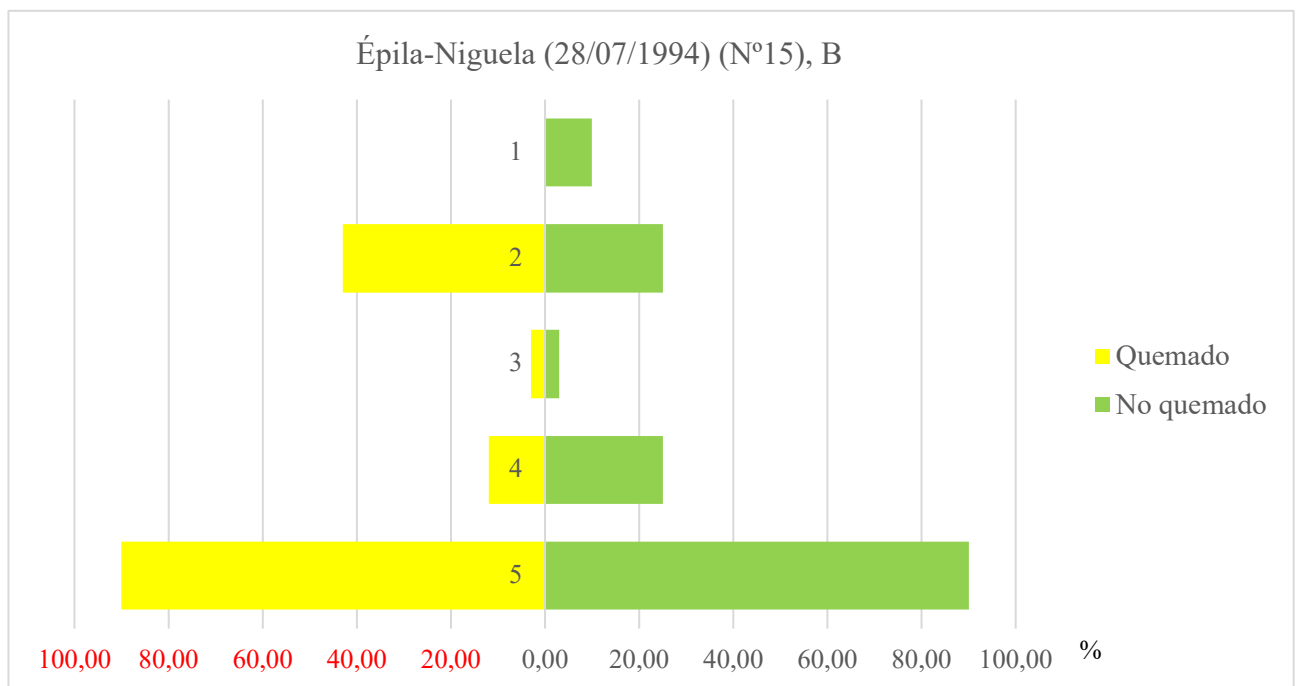


Figura 25. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Épila-Niguela (28/07/1994) (N°15), B

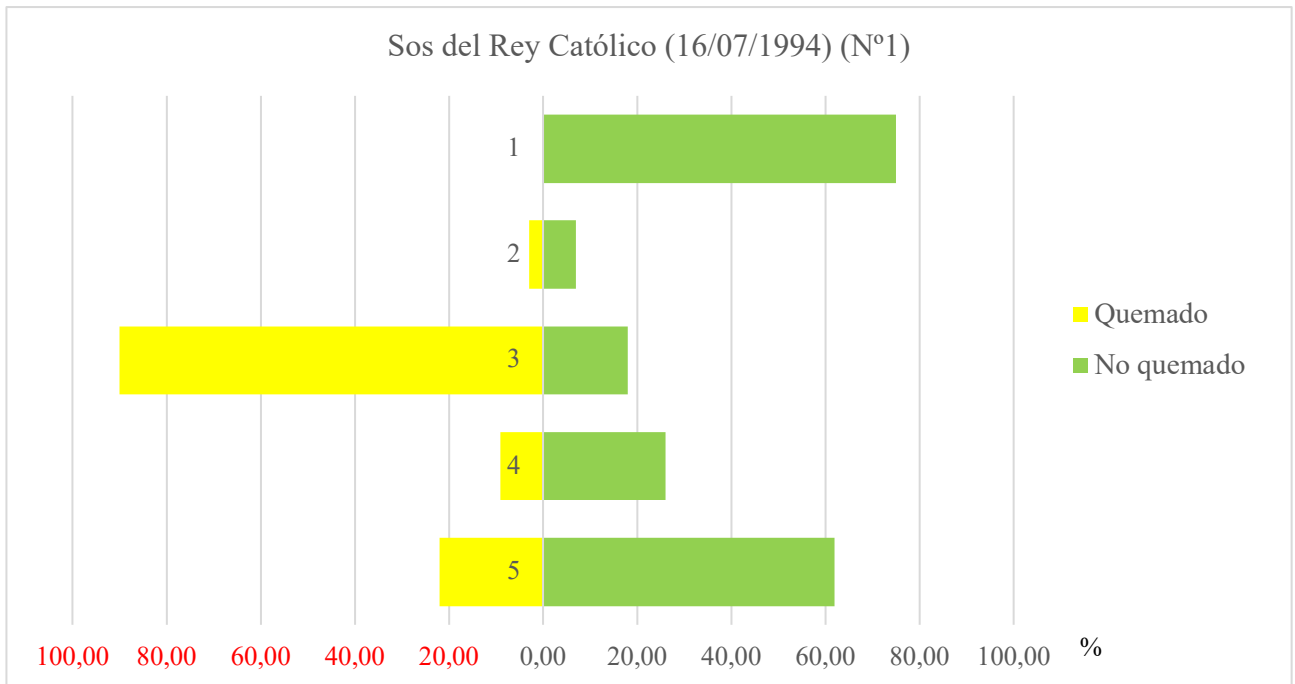


Figura 26. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Sos del Rey Católico (16/07/1994) (Nº1)

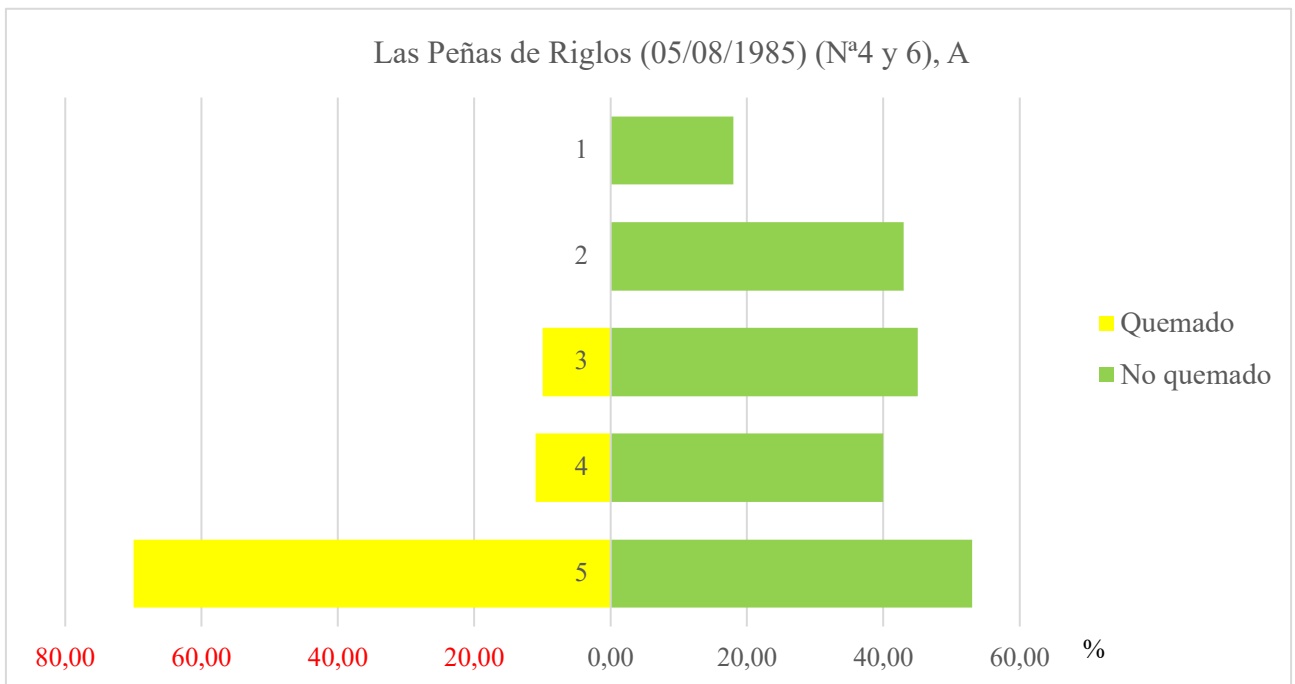


Figura 27. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Las Peñas de Riglos (05/08/1985) (Nª4 y 6), A

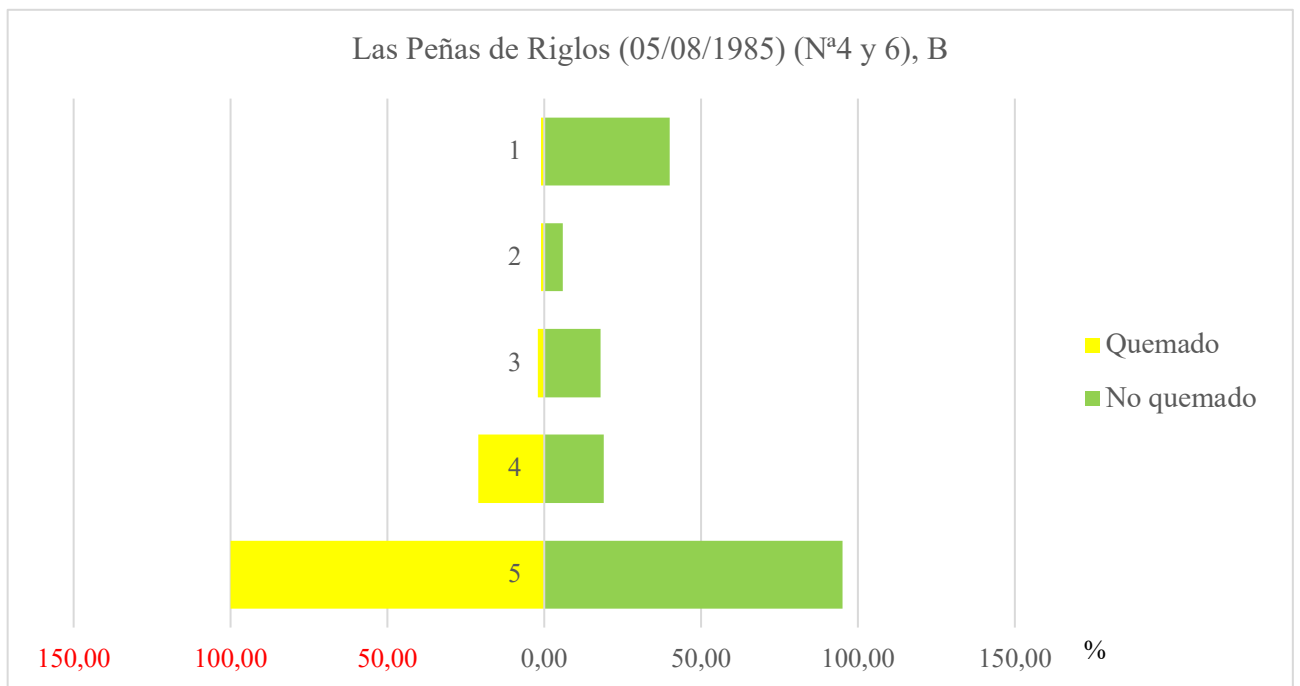


Figura 28. Grado de recubrimiento vegetal pre-incendio y post-incendio en el incendio de Las Peñas de Riglos (05/08/1985) (N^a4 y 6), B

Imágenes descargadas con resolución de 10 y 20 m	
Barranco Moro-Calcearenas-Bernues	
Mayo	S2A_MSIL2A_20170526T105031_N0205_R051_T30TXM_20170526T105518.SAFE
	S2A_MSIL2A_20170526T105031_N0205_R051_T30TXN_20170526T105518.SAFE
Junio	S2A_MSIL2A_20170618T105621_N0205_R094_T30TXN_20170618T110415.SAFE
Julio	S2A_MSIL2A_20170705T105031_N0205_R051_T30TXN_20170705T105605.SAFE
Agosto	S2A_MSIL2A_20170817T105621_N0205_R094_T30TXN_20170817T110525.SAFE
Septiembre	S2A_MSIL2A_20170913T105021_N0205_R051_T30TXN_20170913T105335.SAFE
Zuera-Épila-Riglos-Triste	
Mayo	S2A_MSIL2A_20170516T105031_N0205_R051_T30TXM_20170516T105322.SAFE
Junio	S2A_MSIL2A_20170618T105621_N0205_R094_T30TXM_20170618T110415.SAFE
Julio	S2A_MSIL2A_20170728T105621_N0205_R094_T30TXM_20170728T110406.SAFE
Agosto	S2A_MSIL2A_20170817T105621_N0205_R094_T30TXM_20170817T110525.SAFE
Septiembre	S2A_MSIL2A_20170906T105621_N0205_R094_T30TXM_20170906T110139.SAFE
	S2A_MSIL2A_20170913T105021_N0205_R051_T30TXM_20170913T105335.SAFE
Laosa-Nueno	
Mayo	S2A_MSIL2A_20170526T105031_N0205_R051_T30TYM_20170526T105518.SAFE
Junio	S2A_MSIL2A_20170615T105031_N0205_R051_T31TBG_20170615T105505.SAFE
Julio	S2A_MSIL2A_20170705T105031_N0205_R051_T30TYM_20170705T105605.SAFE
Agosto	S2A_MSIL2A_20170824T105031_N0205_R051_T30TYM_20170824T105240.SAFE
Septiembre	S2A_MSIL2A_20170913T105021_N0205_R051_T31TBG_20170913T105335.SAFE

Tabla 4. Imágenes descargas para las resoluciones espaciales de 10 y 20 m

Reclasificación de las bandas para la imagen R20	
Composite	Sentinel-20 m
Banda 01	02
Banda 02	03
Banda 03	04
Banda 04	05
Banda 05	06
Banda 06	07
Banda 07	08A
Banda 08	11
Banda 09	10

Tabla 22. Reclasificación de las bandas para la imagen R20

Reclasificación de las bandas para la imagen R10	
Composite	Sentinel-10 m
Banda 01	02
Banda 02	03
Banda 03	04
Banda 04	08

Tabla 23. Reclasificación de las bandas para la imagen R10