

Universidad Pública de Navarra (UPNA)

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRÓNOMOS**

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS PARA CARTOGRAFIAR ÁREAS QUEMADAS

presentado por

SANDRA LÓPEZ SÁENZ

MÁSTER EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN (MUSIGT)

Septiembre, 2016



Desde estas líneas quisiera agradecer a todas las personas que han hecho posible que este trabajo vea la luz:

En primer lugar, a mi tutora María González de Audicana, por guiarme en este estudio.

A la Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de La Rioja, por la información facilitada en relación a los datos del incendio de Cervera del Río Alhama.

A todas las personas que día a día trabajan en las labores de coordinación, prevención y extinción de los incendios forestales.

A aquellos amigos, compañeros de trabajo y compañeros del Máster Universitario en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, que de un modo u otro me han ayudado y animado en este camino.

A mi familia, especialmente a mis padres y hermano, por darme la oportunidad de cursar mis estudios universitarios, por su respaldo económico, educarme de la manera que lo han hecho y por su continuo apoyo. En definitiva, por creer siempre en mí.

A todos ellos, GRACIAS.

SANDRA LÓPEZ SÁENZ

Pamplona, septiembre de 2016.

DOCUMENTO I: MEMORIA

DOCUMENTO I: MEMORIA**ÍNDICE**

1 - Resumen / Abstract	1
2 - Antecedentes y justificación	3
2.1 - Los incendios forestales	3
2.2 - La teledetección aplicada a la detección de cambios. Identificación y estimación de áreas quemadas	4
3 - Objetivos	7
4 - Área de estudio y datos de partida	9
4.1 - Áreas de estudio	9
4.2 - Imágenes multiespectrales de partida	10
4.3 - Información de referencia	12
5 - Metodología	13
5.1 - Pre – procesamiento de las imágenes	13
5.2 - Métodos de análisis de detección de cambios	16
5.2.1 - Técnicas basadas en información cuantitativa	16
5.2.1.1 - Diferencia de reflectancia	16
5.2.1.2 - Diferencia de índices espectrales	17
5.2.1.3 - Componentes Principales (CP)	18
5.2.2 - Técnicas basadas en información cualitativa	19
5.2.3 - Análisis de la calidad de los resultados. Matriz de confusión	20
6 - Resultados y discusión	23
6.1 - Métodos unitemporales	23
6.1.1 - Reflectancia post – incendio	23
6.2 - Métodos multitemporales	24
6.2.1 - Diferencia de reflectancia	24
6.2.1.1 - Diferencia de reflectancia en el infrarrojo cercano (IRc)	25
6.2.1.2 - Diferencia de reflectancia en el infrarrojo medio de onda corta (IRm 1)	26
6.2.1.3 - Diferencia de reflectancia en el infrarrojo medio de onda corta (IRm 2)	28
6.2.2 - Diferencia de índices espectrales	30
6.2.2.1 - Índice espectral NDVI	30
6.2.2.2 - Índice espectral NDII	31
6.2.2.3 - Índice espectral NBR	33
6.2.3 - Componentes Principales (CP)	34
6.2.4 - Clasificación no supervisada	38
7 - Conclusiones	41
8 - Bibliografía	43

DOCUMENTO I: MEMORIA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localización de la zona de estudio.....	9
Figura 2: Respuesta espectral media relativa a cada banda. Landsat-8, sensor OLI (http://www.mdpi.com).....	11
Figura 3: Imágenes aniversario, pre y post – incendio correspondientes a los incendios situados en Castellón (superior), Cáceres (central) y La Rioja (inferior).....	14
Figura 4: Composición RGB de distintas fechas. Combinación pre - post incendio (izquierda) y aniversario - post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).....	15
Figura 5: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes pre - post incendio (superior) y combinación de imágenes aniversario - post incendio (inferior). Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 1: situado en Castellón).....	15
Figura 6: Histograma de las imágenes resultantes de la comparación (Elaboración propia).....	17
Figura 7: Proceso de cálculo para la obtención de los componentes principales de una imagen (Elaboración propia).....	19
Figura 8: Histograma de reflectancia para la imagen post – incendio y umbral de área quemada (Incendio 1: situado en Castellón).....	23
Figura 9: Imagen post – incendio (superior) y umbral de reflectancia definido para la zona quemada (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).....	23
Figura 10: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).....	25
Figura 11: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).....	25
Figura 12: Histogramas reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).....	27
Figura 13: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).....	27
Figura 14: Histogramas reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).....	28
Figura 15: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).....	29
Figura 16: Histogramas reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).....	30
Figura 17: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).....	30
Figura 18: Histogramas de reflectancia definidos para la imagen diferencia del índice espectral NDII y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).....	31
Figura 19: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).....	32

Figura 20: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).	33
Figura 21: Histogramas de reflectancia definidos para la imagen diferencia del índice espectral NBR y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).	33
Figura 22: Histogramas de reflectancia definido para el ACP y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes multitemporales Pre – Post (izquierda) incendio y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).	34
Figura 23: ACP aplicado a la combinación multitemporal pre – post incendio (izquierda) y umbral de área quemada (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).	35
Figura 24: ACP aplicado a la combinación multitemporal Aniversario – Post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).	35
Figura 25: Clasificación no supervisada mediante el algoritmo <i>k-means</i> para la imagen multitemporal Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón). Número de clases establecidas 25.	38
Figura 26: Detalle de la clasificación no supervisada para el incendio situado en Castellón. Combinación pre – post incendio (izquierda) y aniversario – post incendio (derecha).	39

DOCUMENTO I: MEMORIA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Situación de las zonas de estudio (<i>Datum ETRS 89</i>).	10
Tabla 2: Bandas espectrales y resolución espacial de Landsat-8 (sensor OLI) (Barsi <i>et al.</i> , 2014).	11
Tabla 3: Características imágenes Landsat-8 (fechas y path/row).	12
Tabla 4: Interpretación cruzada de las composiciones de color (Chuvieco, 2002).	16
Tabla 5: Matriz de confusión para una matriz con $k = 2$	20
Tabla 6: Estadísticas calculadas para el umbral de reflectancia de la imágenes post – incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).	24
Tabla 7: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).	26
Tabla 8: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).	28
Tabla 9: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).	29
Tabla 10: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).	31
Tabla 11: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).	32
Tabla 12: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia del índice espectral NBR y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).	33
Tabla 13: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 1: situado en Castellón).	36
Tabla 14: Eigenvectores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 1: situado en Castellón).	36

INDICE

Tabla 15: Eigenvectores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Aniversario – Post incendio (Incendio 1: situado en Castellón).	37
Tabla 16: Estadísticas calculadas para el ACP y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).	37
Tabla 17: Estadísticas calculadas para la clasificación no supervisada y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).....	39

1 - RESUMEN / ABSTRACT

Análisis de técnicas de detección de cambios para cartografiar áreas quemadas

Los incendios forestales constituyen un grave problema tanto a nivel ambiental como socioeconómico. En la actualidad, la teledetección es una herramienta esencial para la planificación y gestión del territorio a diferentes escalas. En el caso de la detección de áreas quemadas, la importancia reside en la posibilidad de obtener el perímetro, área y el nivel de daño causado por los incendios forestales. El objetivo del presente trabajo es la evaluación de diferentes técnicas multitemporales de detección de cambios para la identificación y estimación de áreas quemadas sobre imágenes multiespectrales de media resolución. Los incendios forestales estudiados se encuentran en España, en las provincias de Cáceres, Castellón y La Rioja. Diferencia de reflectancia, diferencia de índices espectrales, Componentes Principales, y clasificación no supervisada han sido las técnicas analizadas. Todas estas técnicas se han testado sobre imágenes Landsat-8 pre incendio, post incendio así como imágenes aniversario. Como verdad terreno para determinar el potencial de cada una de las técnicas se ha utilizado la cartografía (mapas de delineación y gradiente) elaborados por el Servicio de Gestión de Emergencias perteneciente al programa *Copernicus*. Se ha observado que las técnicas que proporcionan resultados más afines a la verdad terreno es el índice espectral NBR, diferencia de reflectancia (IRm 2) y la técnica de Componentes Principales.

Palabras clave: *Incendios Forestales, Áreas Quemadas, Teledetección, imágenes Landsat TM.*

Analysis of change detection methods for mapping burned areas

Forest fires are a serious ecological and socioeconomic problem. Nowadays, remote sensing is an essential tool for the planning and management of the land at different scales. In the case of detecting burned areas, the importance lies in the possibility to obtain perimeter, area and damage level caused by forest fires. This paper aims to evaluate the different multitemporal change detection techniques used in the identification and estimation of burned areas with medium resolution multispectral imagery. The forest fires studied are located in Spain, in the regions of Cáceres, Castellón and La Rioja. The methods used have been Difference Reflectance, Difference Spectral Indices, Principal Components and Unsupervised Classification, all tested on Landsat TM 8 pre-fire and post-fire images, as well as *anniversary images*. Delineation and grading maps developed by the Copernicus Emergency Management Service have been used as ground truth to determine the potential of each one of the techniques. It has been observed that the analyses providing more akin results to ground truth are Spectral Index NBR, Difference Reflectance (SWIR 2) and Principal Components.

Keywords: *Forest Fires, Burned Areas, Remote Sensing, Landsat TM images.*

2 - ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

2.1 - LOS INCENDIOS FORESTALES

El fuego está presente desde siempre. Durante miles de años, éste ha sido un agente natural que ha modelado la mayoría de los ecosistemas, desempeñando un papel decisivo en la evolución del paisaje. La acción de los incendios regula la composición de la vegetación y es considerado como un proceso vital para iniciar los diferentes ciclos vegetativos (Roy, 2003).

Sin embargo el alcance, la frecuencia y la intensidad de los incendios forestales en las regiones mediterráneas se ha convertido en un importante problema en los últimos tiempos debido a la acción humana, ya sea de forma accidental o intencionada (Gillespie *et al.*, 2007). Constituyendo así, un grave problema tanto a nivel ecológico como socio económico.

Vélez Muñoz (2009) define como incendio forestal a *aquel fuego que se extiende sin control sobre combustibles forestales situados en el monte, afectando a vegetación que no estaba destinada a arder.* Del mismo modo, se entiende por monte *todo el terreno en el que vegetan especies forestales arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, sea espontáneamente o procedan de siembra o plantación, que cumplan o puedan cumplir funciones ambientales, protectoras, productoras, culturales, paisajísticas o recreativas.*

Los incendios forestales reciben la denominación general de siniestros. Se clasifican en conatos, cuando afectan a superficies menor a 1 ha, e incendios, si la superficie es mayor o igual a 1 ha, distinguiéndolos como grandes incendios si se superan las 500 ha.

En España, según datos oficiales publicados por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente el número medio de siniestros que se producen al año es de 14 500 aproximadamente, afectando a 108 500 ha de superficie forestal (MAGRAMA, 2015). La magnitud de las cifras anuales sobre el número de siniestros y las superficies recorridas por el fuego revela que el problema de los incendios forestales afecta en mayor o menor medida a muchos países del mundo (Vélez Muñoz, 2009).

La severidad y recurrencia de estos fenómenos se prevé que irá en aumento como consecuencia de los efectos del cambio climático. Este hecho se debe principalmente a factores tales como la deforestación, alteraciones en el comportamiento climático y cambios en los usos del suelo (Chowdhury & Hassan, 2015). Los diferentes cambios de uso de suelo junto con el abandono de las prácticas rurales tradicionales ha facilitado la acumulación de biomasa, lo que conlleva el aumento del riesgo potencial de incendios forestales (Chuvieco *et al.*, 2010).

En la región mediterránea, las características climáticas propias como la aridez estival, que facilita la ocurrencia de incendios, y las precipitaciones torrenciales en otoño, que provocan la erosión del suelo en áreas quemadas, hacen que los riesgos derivados de los incendios forestales sean un verdadero problema. Por este motivo, suponen una gran amenaza provocando graves alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, debido al aumento de temperaturas y a la acumulación de cenizas (Peay *et al.*, 2009).

Los efectos de los incendios forestales dependen de la escala del análisis, tanto espacial (dónde y qué se ha quemado) como temporal (cuándo). Según Lentile *et al* (2006) estos fenómenos a escala local provocan la alteración de la estructura y composición del suelo y la vegetación, además de la pérdida de diversidad de especies y del paisaje. A nivel regional, pueden influir sobre los ecosistemas acuáticos, afectando la cantidad y calidad del agua y acelerando procesos como la erosión y sedimentación. Por último, a escala global, las emisiones generadas por grandes incendios tienen un impacto directo sobre la atmósfera y los ciclos biogeoquímicos de la Tierra. Además, tanto a nivel local como regional, las emisiones gaseosas afectan la calidad del aire, por lo que son considerados un riesgo para la salud humana. También es importante señalar la pérdida de bienes, vidas humanas y heridos que estos desastres naturales provocan en muchas ocasiones.

Debido a los importantes impactos ambientales, sociales y económicos que producen es necesaria la búsqueda de herramientas y técnicas que permitan el estudio de estos fenómenos.

2.2 - LA TELEDETECCIÓN APLICADA A LA DETECCIÓN DE CAMBIOS. IDENTIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS

En los últimos años, la teledetección se ha convertido en una herramienta prácticamente imprescindible para la planificación y gestión territorial a diversas escalas. En principio, cualquier fenómeno en el que se origine una respuesta espectral de la superficie terrestre, tanto en el espacio como en el tiempo, es susceptible de ser estudiado mediante esta técnica. La gran variedad de sensores y productos disponibles en la actualidad, permite trabajar a todo tipo de escalas así como adquirir información de lugares poco accesibles.

Un ejemplo de especial relevancia por su repercusión social y ambiental es la gestión mediante esta técnica de riesgos naturales, como pueden ser inundaciones, terremotos, incendios, sequías, etc. Diversos equipos de investigación a nivel nacional e internacional trabajan actualmente en el desarrollo de métodos que permitan la predicción, gestión y cartografía de riesgos naturales a partir de teledetección espacial (Martín Isabel *et al.*, 2007).

Las aplicaciones de la teledetección al análisis de los incendios forestales se pueden agrupar en tres marcos de actuación diferentes: momento previo, simultáneo y posterior al fuego. Los dos primeros integran, respectivamente, estudios dirigidos a la determinación de índices de peligrosidad y la detección de focos activos, mientras que el tercero reúne estudios sobre la evaluación y consecuencias de los fuegos (Pérez Cabello & De la Riva Fernández, 1998). Existe abundante bibliografía que documenta el uso generalizado de la teledetección en los ámbitos anteriormente citados: detección de focos activos (Roy *et al.*, 1999, Li *et al.*, 2004, Calle *et al.*, 2008), estimación del riesgo de incendios (González-Alonso *et al.*, 1997) severidad de éstos (Roldán-Zamarrón *et al.*, 2006, De Santis & Chuvieco, 2007, González-Alonso *et al.*, 2007).

Aspectos de la observación espacial como son la cobertura global, la observación periódica, la visión panorámica, información sobre regiones no visibles del espectro y el formato digital hacen de la teledetección un método óptimo para la cartografía y evaluación de las áreas quemadas (Blas Morato *et al.*, 2006).

En lo relativo al estudio de estas zonas, un sistema de gestión requiere una evaluación global de las zonas afectadas por el fuego, en términos de área y perímetro, así como del nivel de daño producido en la vegetación y en el suelo (De Santis & Vaughan, 2009; Bastarrika *et al.*, 2011). Del mismo modo, la estimación de las superficies quemadas de una forma rápida, precisa y económica es de vital importancia para la localización de zonas de intervención prioritaria, así como para la planificación de futuros trabajos de restauración, mitigar la erosión del suelo y favorecer la regeneración de la vegetación (De Santis & Vaughan, 2009). En España, la cuantificación de áreas quemadas se realiza habitualmente delimitando el perímetro de la superficie afectada mediante la utilización de un GPS. Esta metodología, no es completamente fiable y precisa (Roy, 2003; Huesca *et al.*, 2008), ya que en la mayoría de los casos, el perímetro obtenido no incluye manchas interiores y tampoco distingue el nivel de daño que ha producido el fuego.

El empleo de la teledetección en la detección de las zonas afectadas por los incendios es posible a través de las diferencias existentes entre las firmas espectrales de la vegetación quemada y la no quemada. Para caracterizar espectralmente la vegetación es necesario tener en cuenta dos clases diferentes de señal: la que proviene de la formación y deposición de las cenizas y la procedente de la modificación de la estructura y la cantidad de vegetación existente. El primer tipo de señal aparece como consecuencia de la combustión de la vegetación y tiene como desventaja que dura poco tiempo y se

degrada por la acción del viento y la lluvia. De hecho, los efectos son eliminados en unas pocas semanas o meses después del incendio. La segunda señal es más estable, pero es menos clara para diferenciar los efectos del fuego, debido a que la eliminación parcial o total de la vegetación puede ser causada por otros factores, como el de la deforestación, estrés de la vegetación o la acción de plagas (Pereira *et al.*, 1999). De este modo, los cambios que se producen son: disminución de la capacidad fotosintética (observada en el visible e infrarrojo cercano), cambio en la estructura de la vegetación (infrarrojo cercano), pérdida del contenido de agua (infrarrojo medio de onda corta) o incluso en la proporción de cenizas y carbón acumulado en la superficie (visible e infrarrojo medio de onda corta)

El infrarrojo cercano (IRc) es la región del espectro donde la afección en la señal emitida por las áreas quemadas es más evidente, especialmente cuando la cantidad quemada es mayor y como consecuencia de la combustión se ha producido una gran cantidad de carbón sobre el suelo, originándose así, una disminución de la reflectancia. Por el contrario, en las regiones tanto del visible como del infrarrojo medio de onda corta (IRm), la reflectancia aumenta. En el visible, este hecho se incrementa como consecuencia de la pérdida de clorofila, mientras que en el IRm, la reflectancia aumenta debido a la disminución de la humedad de las plantas. El aumento es mayor en esta última región espectral que en el visible. Además, la reflectancia de las áreas quemadas en el IRm es menor que la de las zonas no incendiadas como pueden ser el suelo desnudo, afloramientos rocosos o zonas urbanas (Pereira *et al.*, 1999).

En resumen, cambios por el fuego como la disminución en el contenido de clorofila y humedad de la vegetación, además del deterioro en la estructura interna de la hoja producen un aumento de la respuesta espectral en la región del infrarrojo medio de onda corta y una disminución en el infrarrojo cercano.

Según De Santis & Vaughan (2009) en líneas generales, los incendios alteran la cubierta vegetal, reduciendo la clorofila y el contenido de humedad. Asimismo, incrementan el porcentaje de suelo descubierto, lo carbonizan y alteran su color y humedad. Estos efectos en la vegetación y el suelo producen cambios en los patrones de reflectancia, que pueden ser detectados mediante el análisis de imágenes de satélite. Por esta razón, la teledetección se plantea como una alternativa muy sólida para cartografiar áreas quemadas, ya que proporciona una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada así como una información espectral que permite la separación de las áreas quemadas respecto a otros tipos de coberturas.

Además, las aportaciones realizadas por diversos autores hasta el momento, demuestran la capacidad de los sensores comerciales actuales para delimitar zonas afectadas por los incendios forestales. La precisión de las estimaciones depende, fundamentalmente, del tipo de imagen y del método utilizado (Gómez Nieto & Martín Isabel, 2008).

La elección de un tipo u otro de sensor está estrechamente relacionada con la escala de trabajo. Los más utilizados en proyectos a nivel global son NOAA-AVHRR y MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectre radiometer) a bordo de los satélites Tierra y Agua. Landsat, Spot, Sentinel o sensores de muy alta resolución como Quickbird, Ikonos o Pleiades se usan para estudios que requieren un mayor detalle, por ejemplo a escala regional.

Existen numerosos métodos para cartografiar superficies quemadas utilizando la teledetección y en función del tipo de dato (fecha) empleado, pueden ser agrupadas en dos clases. Técnicas unitemporales que emplean únicamente imágenes de una fecha (post incendio) y aquellas que comparan imágenes de varias fechas, generalmente imágenes pre-post incendio, es decir, métodos multitemporales

Según De Santis & Vaughan (2009), el objetivo principal de los métodos unitemporales es definir grupos de píxeles homogéneos para encontrar la relación óptima entre los errores de comisión y omisión. El procedimiento más habitual es aplicar un umbral (*threshold*) a las bandas originales o al resultado de los índices espectrales. La aplicación de umbrales muy exigentes produce la reducción de las áreas no

MEMORIA

quemadas que aparecen discriminadas como errores de comisión, al mismo tiempo que producen el aumento de los píxeles realmente quemados que no son detectados (errores de omisión). Por otro lado, la dificultad para extraer el perímetro del área quemada debido a la existencia de diferente tipo de vegetación (Martín, 1998) produce que los métodos multitemporales representen una alternativa más viable. Algunos autores como Bastarrika & Chuvieco (2006), Oliva & Martín (2007) han usado este tipo de metodología en sus estudios.

Las técnicas multitemporales se basan en la comparación de imágenes captadas pre y post fuego. Así, aunque se trata de técnicas más precisas, requieren una cantidad superior de datos de partida. Los cambios en las características espectrales de estas zonas pueden ser detectados empleando combinaciones apropiadas de bandas o índices espectrales, facilitando así la detección de modificaciones en las cubiertas. En este caso, resulta necesario la homogeneización radiométrica y la corrección geométrica entre las imágenes utilizadas (De Santis & Vaughan, 2009). La discriminación del área quemada mediante el empleo de estos índices ha sido analizada por multitud de autores (Heredia *et al.*, 2003; Gómez Nieto & Martín Isabel, 2008; Bastarrika *et al.*, 2011).

Otro tipo de métodos son el Análisis de Componentes Principales (ACP) testado por Heredia *et al.* (2003), y Martín & Chuvieco (2001), la técnica del vector de cambio, y las clasificaciones supervisada o no supervisada de las bandas originales (Miller *et al.*, 2002).

Por último, una característica importante a tener en cuenta en este tipo de investigaciones es la severidad de la zona quemada. Se define como el grado de los cambios medioambientales causados por el fuego (Epting *et al.*, 2005). La estimación de ésta en campo depende del tipo de cambio objeto de interés. Algunos aspectos de referencia para esta estimación son la mortalidad de árboles, consumo y carbonización de los perfiles orgánicos del suelo, etc. Choung *et al.* (2004) y Blas Morato *et al.* (2006) son algunos de los autores que han analizado la severidad en sus investigaciones.

3 - OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo Fin de Máster es el de analizar el potencial de diferentes técnicas de detección de cambios para determinar la superficie afectada por incendios forestales utilizando como información de partida imágenes multispectrales de media resolución espacial, de libre acceso.

De este objetivo, se derivan los siguientes más específicos:

- Analizar y comparar los siguientes métodos de detección de cambios para la determinación y cartografía de áreas quemadas: diferencia de reflectancia, diferencia de índices espectrales, componentes principales y clasificación no supervisada.
- Analizar y comparar la técnica de definición de umbrales de reflectancia de modo unitemporal y multitemporal.
- Evaluar la utilidad de las imágenes Landsat-8 para la estimación de áreas quemadas por incendios forestales.
- Analizar y comparar el potencial de las posibles combinaciones multitemporales de imágenes:
 - a) combinación pre – post incendio.
 - b) combinación multitemporal aniversario – post incendio.

4 - ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA

4.1 - ÁREAS DE ESTUDIO

Copernicus, es el programa europeo de Observación de la Tierra para el Medio Ambiente cuyo objetivos son: facilitar la gestión medioambiental, mitigar efectos del cambio climático y mejorar la seguridad civil (Camacho *et al.*, 2013). Consiste en un complejo conjunto de sistemas que recoge datos de múltiples fuentes como satélites de observación de la Tierra y sensores “in situ”, procesando y proporcionando estos datos a los usuarios.

En la misma línea, el Servicio de Gestión de Emergencias (EMS) forma parte de este programa y elabora mapas basados en imágenes satelitales con cobertura mundial para todos aquellos implicados en la gestión de crisis de este tipo de fenómenos. Esta cartografía es de gran utilidad y en ella destacan los mapas de Referencia (que facilitan un conocimiento del territorio y de las infraestructuras de la zona antes de producirse el desastre), mapas de Delineación en los que se recoge la extensión y delimitación de la zona afectada del desastre y su evolución, y por último, los mapas de Gradiente que facilitan un cálculo del grado de afección o daño y su evolución.

Para la elección de los diferentes desastres naturales a estudiar en el presente trabajo se han utilizado varios incendios (casos situados en Cáceres y Castellón) en los que aparece información relativa a ellos en el programa *Copernicus* y en el EMS. El objetivo principal, es emplear esta cartografía como información de referencia.

El tercer incendio del estudio está localizado en la Comunidad Autónoma de La Rioja.

A continuación se realiza una breve caracterización de ellos. En la Tabla 1 se detallan las coordenadas de éstos y en la Figura 1 su localización.

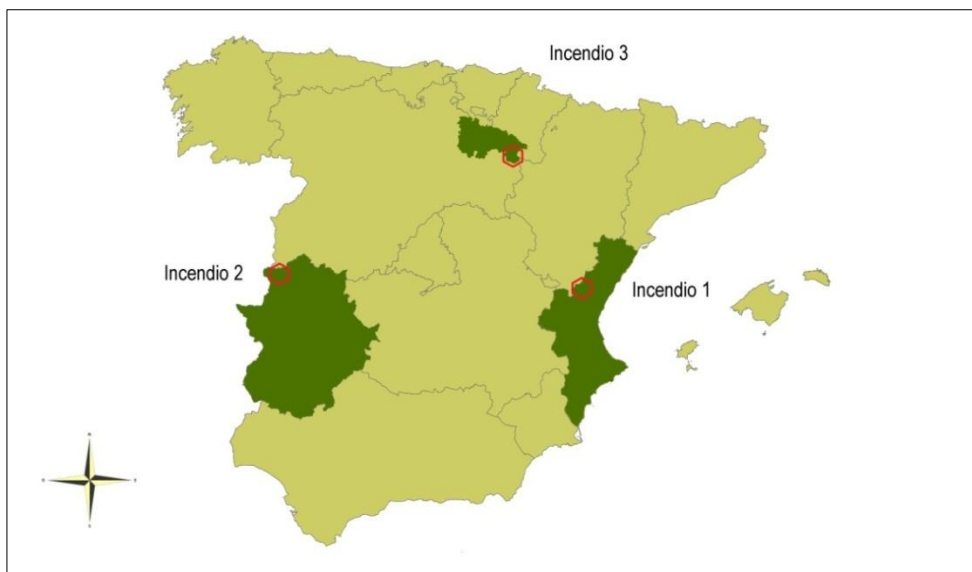


Figura 1: Localización de la zona de estudio.

Incendio 1: El primer incendio forestal analizado se declaró el día 7 de julio de 2015 en los municipios de Montán y Caudiel (Castellón). La causa origen fue un rayo. La zona afectada se encuentra próxima a la Sierra de Espada, la cual sufrió un devastador incendio 21 años antes. El total de área afectada fue de 426,3 ha (<http://emergency.copernicus.eu>).

Incendio 2: se originó el 6 de agosto de 2015 en el Término Municipal de Acebo, Cáceres. El fuego se extendió a otros municipios cercanos (Perales del Huerto y Hoyos) representando un grave

peligro para la población. La superficie forestal afectada fue de 2 250 ha aproximadamente (<http://emergency.copernicus.eu>).

Incendio 3: El 26 de Agosto de 2015 tuvo lugar el tercer incendio estudiado en el presente trabajo. La zona quemada se encuentra en el término municipal de Cervera del Río Alhama (La Rioja). Encinares, mezcla de matorrales de labiadas y tomillares y cultivos agrícolas conforman la superficie afectada (223 ha, aproximadamente) (Consejería de Medio Natural del Gobierno de La Rioja).

Tabla 1: Situación de las zonas de estudio (*Datum ETRS 89*).

	USO (UTM)	COORDENADA X (UTM)	COORDENADA Y (UTM)
Incendio 1	29 N	694408	4453826
Incendio 2	30 N	709677	4432549
Incendio 3	30 N	583731	4651702

4. 2 - IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE PARTIDA

A la hora de seleccionar las imágenes, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos fundamentales para la delimitación de zonas incendiadas:

1. Tipo de imágenes a utilizar: en la evaluación detallada de daños producidos por desastres naturales son recomendables imágenes captadas por sensores multi o hiperespectrales de alta resolución espacial.

2. Fecha de las imágenes a comparar: para la detección de cambios en zonas forestales, son más idóneas las imágenes de verano con el objetivo de asegurar mejor contraste con zonas agrícolas (Copin & Bauer, 1996). Del mismo modo, las imágenes aniversario minimizan la influencia de la posición solar y la estacionalidad de las cubiertas. El hecho de que la mayoría de las imágenes sean de verano evita la existencia de posibles superficies enmascaradas por sombras topográficas.

3. Co-registro de las imágenes: el uso de imágenes mal co-registradas puede llevar a detectar falsos cambios.

4. Imágenes en valores absolutos de reflectancia o radiométricamente normalizadas: este tipo de imágenes son necesarias para evitar detectar como cambios en las cubiertas los debidos a la distinta posición solar, condiciones atmosféricas y de calibración del sensor en las fechas consideradas.

5. Imágenes de libre acceso: la libre disposición de imágenes satelitales permite su utilidad en multitud de estudios. No se han podido emplear imágenes Sentinel ya que no se han encontrado imágenes de calidad para las fechas y lugares analizados.

Las imágenes escogidas proceden del satélite Landsat-8 TM (sensores OLI/TIRS abordo). Éstas, son especialmente adecuadas para la cartografía temática y el análisis multitemporal.

Landsat-8, cuya órbita es heliosíncrona, proporciona imágenes de 12 bits en 11 bandas espectrales: una correspondiente a aerosoles (banda 1), tres visibles (bandas 2, 3 y 4), una en el infrarrojo cercano -IRc- (banda 5), dos en el infrarrojo cercano de onda corta -IRm- (bandas 6 y 7), una pancromática (banda 8), banda 9 (*cirrus*), y dos en el infrarrojo térmico -IRt- (bandas 10 y 11). Las longitudes de onda de cada se muestran en la Tabla 2.

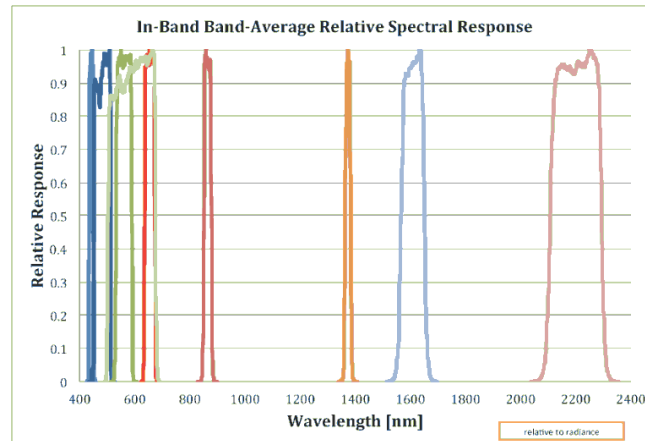


Figura 2: Respuesta espectral media relativa a cada banda. Landsat-8, sensor OLI (<http://www.mdpi.com>).

Las resoluciones espaciales proporcionadas por este satélite son 15 m en pancromático y 30 m en multiespectral para el sensor OLI y 100 m para el sensor TIRS. Circunda la Tierra cada 98,9 minutos (14 vueltas completas al día) y su resolución temporal es de 16 días. La adquisición de las imágenes es a las 9:45-10 am, aproximadamente y el tamaño de éstas es de 185 x 185 km.

Tabla 2: Bandas espectrales y resolución espacial de Landsat-8 (sensor OLI) (Barsi *et al.*, 2014).

BANDA	LONGITUD DE ONDA (μm)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)
Aerosol (CA)	0,433 – 0,453	30
Azul	0,450 – 0,515	30
Verde	0,525 – 0,600	30
Rojo	0,630 – 0,680	30
IRc	0,845 – 0,885	30
IRm	1,560 – 1,660	30
IRm	2,100 – 2,300	30
Cirrus	1,360 – 1,390	30
PAN	0,500 – 0,680	15

Las imágenes, con valores de reflectancia superficial, se obtuvieron de forma gratuita desde la sección *EarthExplorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov>) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Los archivos de imágenes Landsat se catalogan según el sistema *Worldwide Reference System* (WRS-2). Así, el territorio se organiza en escenas, ordenadas según la pasada y el número de imagen en la pasada (Path y Row). Siguiendo esta notación global se han descargado las imágenes necesarias para el presente estudio. Las características relativas a cada una de ellas se detallan en la Tabla 3.

Se han utilizado escenas relativas a dos fechas:

- Anteriores al incendio forestal: imágenes pre – incendio e imágenes aniversario (cuyo objetivo es minimizar las condiciones de iluminación y posibles cambios fenológicos en las cubiertas).
- Posteriores: post - incendio.

Tabla 3: Características imágenes Landsat-8 (fechas y path/row).

	IMAGEN ANIVERSARIO	IMAGEN PRE	IMAGEN INCENDIO	IMAGEN POST	ESCENA PATH/ROW
Incendio 1 (Castellón)	07/08/2014	07/06/2015	07/07/2015	10/08/2015	199 / 32
Incendio 2 (Cáceres)	22/10/2014	19/06/2015	06/08/2015	23/09/15	203 / 32
Incendio 3 (La Rioja)	17/10/2014	30/06/2015	26/08/2015	18/09/2015	200 / 31

4.3 - INFORMACIÓN DE REFERENCIA

La validación de los resultados obtenidos con las diferentes técnicas analizadas, requiere el contraste de los mismos frente a la verdad – terreno. Como ya se citó en el apartado 4.1 - Áreas de estudio, la información que se ha empleado como referencia en el presente trabajo se ha obtenido del programa europeo de Observación de la Tierra para el Medio Ambiente, *Copernicus*. Esta información es de libre acceso desde la página web <http://emergency.copernicus.eu>.

La cartografía proporcionada por *Copernicus* está elaborada empleando imágenes multiespectrales captadas por el sensor satélite Pleiades, a las que se les ha aplicado un proceso de realce espacial (Pan – Sharpening) y cuya resolución espacial es de 0,50 m. En esta misma línea, los productos suministrados por el EMS y que se han utilizado en el proceso de verificación han sido los mapas de delineación que proporcionan la extensión y delimitación de la zona afectada. Además, el EMS ofrece mapas de gradiente en los que se caracteriza el grado de afección o daño producido sobre la cubierta terrestre y constituyen una importante fuente de información para la estimación de la severidad.

5 - METODOLOGÍA

5.1 - PRE – PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Al igual que se citó en el apartado 4. 2 - Imágenes multiespectrales de partida, es necesario asegurar que las imágenes sean de la misma fecha o época del año, captadas por el mismo sensor o similares, sean imágenes co-registradas y radiométricamente normalizadas.

Por ello, se han utilizado imágenes ortorrectificadas. En lo relativo a la corrección radiométrica, no se ha aplicado ya que no se considera necesaria si se trabaja en unidades absolutas (reflectancia superficial), como es en este caso, y en los mismos intervalos del espectro electromagnético.

Además, de todas las imágenes de partida así como de las obtenidas tras aplicar alguno de los métodos de detección de cambios, se ha visualizado su histograma para comprobar que el máximo absoluto de la distribución de frecuencias se encuentra centrado en el cero. En caso contrario, se hubiera procedido a la normalización radiométrica de las imágenes mediante métodos basados en selección de muestras invariantes, que proporcionan mejores resultados (Mateu & Ruiz, 1999).

Una vez realizados estos procesos, se unieron las bandas de cada imagen en un único fichero multitemporal de 12 bandas. Para trabajar tan sólo con la zona que nos interesa analizar, se recortaron estas imágenes originales. Además, se han realizado varias composiciones en color tanto de las imágenes pre y post incendio, así como de las imágenes aniversario. Para ello, se ha aplicado uno de los tres colores primarios (rojo, verde, y azul) a una banda distinta de la imagen. El objetivo es visualizar información de distintas regiones del espectro, de forma simultánea, facilitando la delimitación visual de algunas cubiertas.

En la Figura 3 pueden observarse las diferentes composiciones en color de las imágenes utilizadas para caracterizar los incendios forestales. Se delimita visualmente las diferentes cubiertas. La zona incendiada se muestra en un tono verdoso.

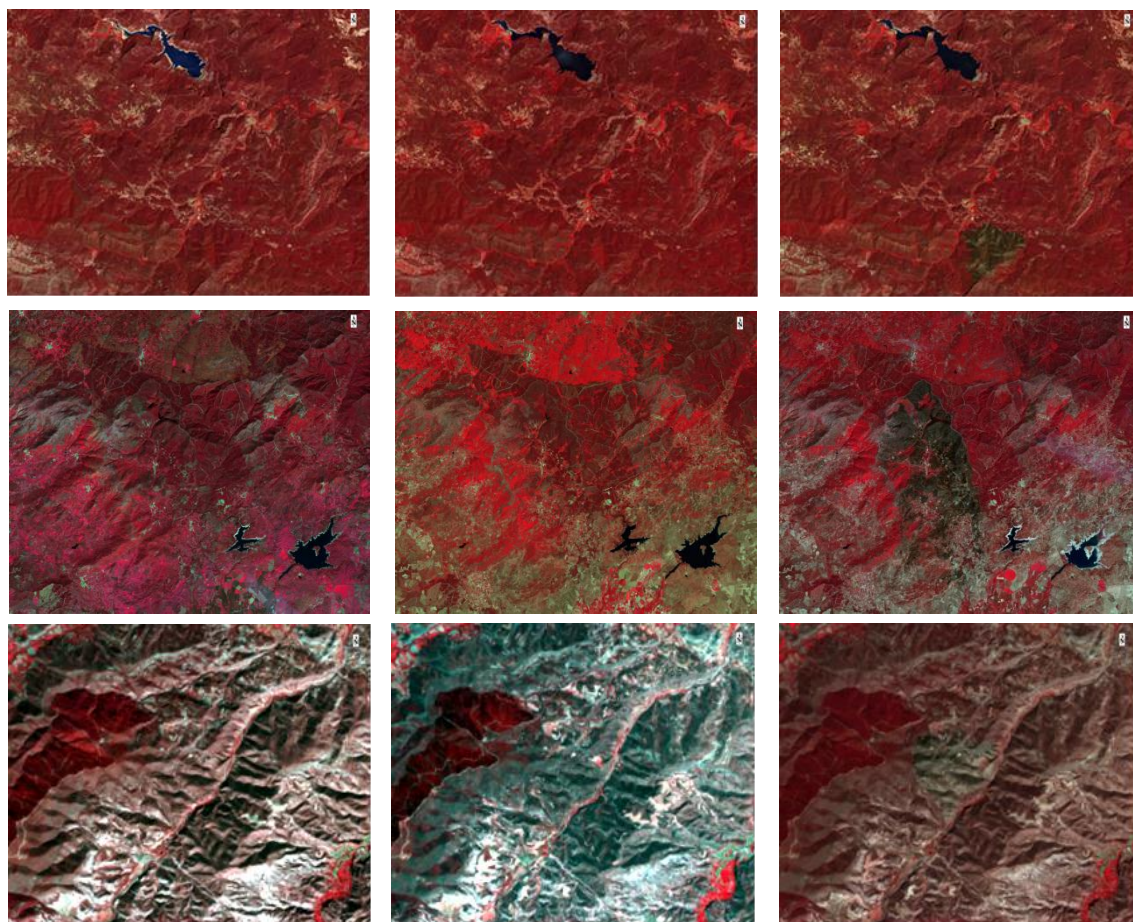


Figura 3: Imágenes aniversario, pre y post – incendio correspondientes a los incendios situados en Castellón (superior), Cáceres (central) y La Rioja (inferior).

Por último, antes de estimar los diferentes métodos de detección de cambios, se realizaron dos tipos de composiciones RGB multitemporales. En las Figuras 4 y 5 se muestran los resultados de estas técnicas visuales para el incendio forestal localizado en Castellón (el resto, aparecen recogidos en el Anexo).

1. Composiciones de distintas fechas: se basan en composiciones RGB multiespectrales, de imágenes de una misma banda espectral adquiridas en distintas fechas. Por lo tanto, la interpretación del color dependerá de qué fecha se asigne a cada uno de los colores básicos de visualización. En este caso, se ha empleado la banda del Infrarrojo cercano en todas las imágenes a comparar. Como resultado de esta composición en color, la zona quemada se visualiza en azul, mientras que la zona no afectada presenta colores grisáceos.

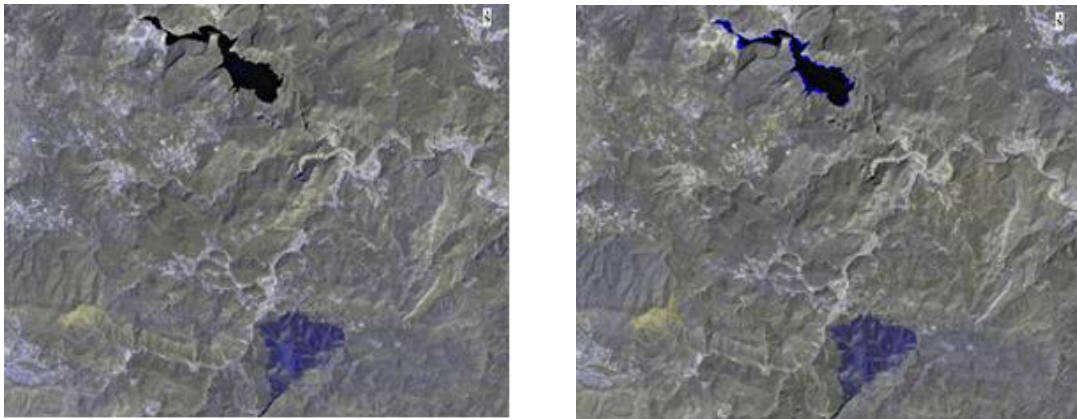


Figura 4: Composición RGB de distintas fechas. Combinación pre - post incendio (izquierda) y aniversario - post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

2. Interpretación cruzada: en esta técnica se analizan composiciones RGB de distintas fechas en distintas bandas, como la propuesta por Chuevieco (2002).

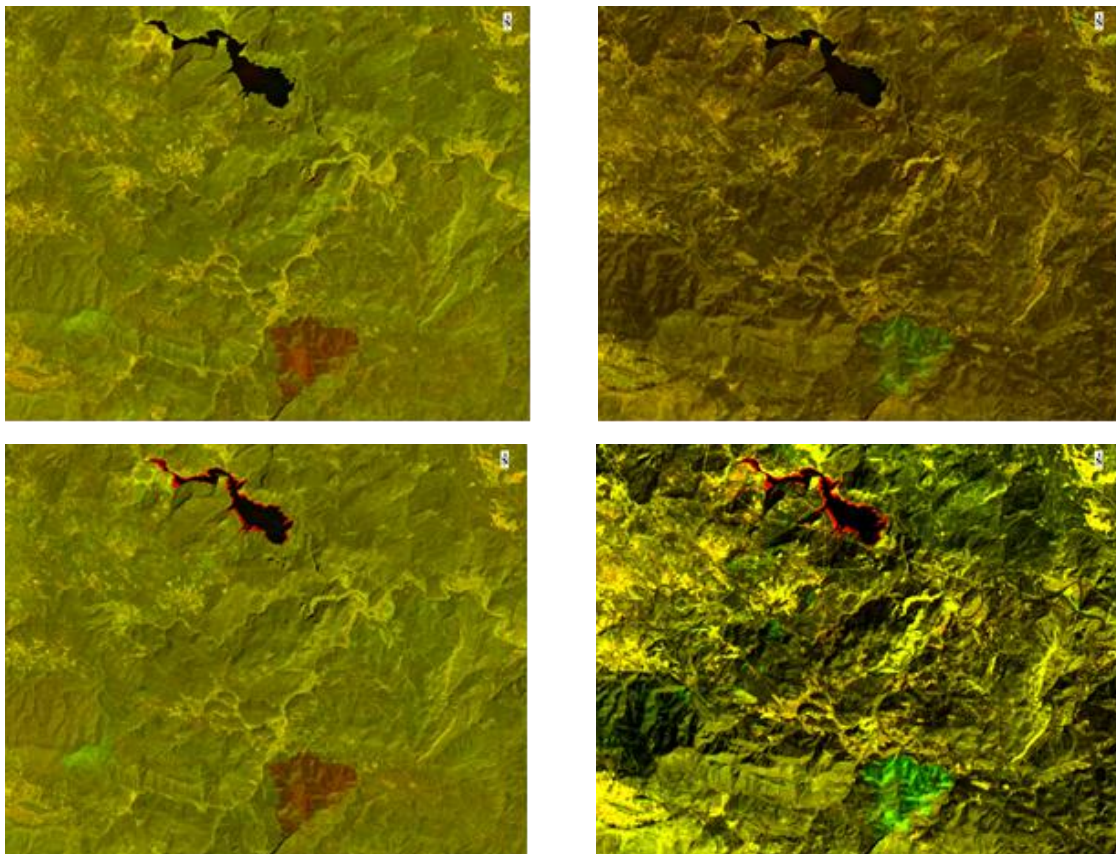


Figura 5: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes pre - post incendio (superior) y combinación de imágenes aniversario - post incendio (inferior). Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 1: situado en Castellón).

En las dos composiciones en color realizadas, en una se ha utilizado la banda del Infrarrojo cercano, y en la otra, la banda del Infrarrojo medio de onda corta. Por último, en base a la siguiente tabla se evalúa el cambio acaecido en la cubierta analizada.

Tabla 4: Interpretación cruzada de las composiciones de color (Chuvieco, 2002).

Interpretación cruzada		IRC (color en pantalla)		
		Tonos rojos	Tonos verdes	Tonos amarillos
SWIR (color en pantalla)	Tonos rojos	Suelo a agua	Suelo a vegetación	Suelo seco a húmedo
	Tonos verdes	Vegetación a suelo	Agua a suelo	Suelo húmedo a seco
	Tonos amarillos	Vegetación senescente	Vegetación emergente	Sin cambios

Para ambos casos, en la primera composición en color, el Infrarrojo cercano se visualiza en pantalla en un tono rojo mientras que el Infrarrojo medio lo hace en verde. De este modo, siguiendo la metodología propuesta por Chuvieco (2002), el cambio producido en la cubierta analizada es de vegetación a suelo. Destacar que al tratarse de cubiertas forestales, éstas pueden haber sufrido procesos de talas entre las fechas anteriores al incendio y la posterior ya que al utilizar esta técnica no se diferencian estos procesos de las cubiertas quemadas.

5.2 - METODOS DE ANALISIS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS

En el apartado 2.2 - La teledetección aplicada a la detección de cambios. Identificación y estimación de áreas quemadas, se hace referencia a cómo las técnicas de discriminación de incendios pueden ser clasificadas principalmente en dos grandes grupos (unitemporales y multitemporales).

En el presente trabajo se han utilizado principalmente este último tipo de técnicas. Así, se han utilizado dos combinaciones multitemporales de imágenes con distintas fechas para compararlas entre sí:

- Comparación entre imágenes con fecha anterior y posterior al incendio, es decir con fechas próximas (Combinación pre - post incendio).
- Comparación entre imágenes aniversario (imágenes pre incendio con similar fecha y estado fenológico de las cubiertas vegetales) y posterior al incendio (Combinación aniversario - post incendio).

5.2.1 - TÉCNICAS BASADAS EN INFORMACIÓN CUANTITATIVA

5.2.1.1 - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA

Esta técnica consiste en la búsqueda de la diferencia (o cociente) entre las imágenes correspondientes a la combinación pre - post incendio y a la formada por la imagen aniversario y la post incendio. De esta manera, al comparar imágenes de la misma banda del espectro electromagnético (adquiridas en distintas fechas) permite detectar cambios en las cubiertas.

Para el desarrollo de este método se parte inicialmente de la composición de imágenes creada con las imágenes recortadas, tanto de la combinación pre - post incendio como de la combinación de las imágenes aniversario - post incendio. Posteriormente, se calcula la diferencia de valores de reflectancia de una misma banda espectral entre diferentes fechas. Esta diferencia se ha estimado para las siguientes

bandas: infrarrojo cercano (IRc), Infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) e infrarrojo medio de onda corta (IRm 2).

Por último, sobre las imágenes diferencia obtenidas anteriormente, se determinó el límite del umbral de cambio en base a la distribuciones de los valores de los pixeles para obtener un histograma tan sólo de la zona quemada. Para ello, se crearon diferentes áreas de interés (ROI).

Generalmente, las imágenes resultantes de la diferencia presentan histogramas con un perfil Gaussiano, con las máximas frecuencias en las zonas próximas 0 y los cambios recogidos en ambas colas del histograma. Estos cambios dependerán del signo del cambio, y por lo tanto, se acumularán en un lado o en otro del histograma.

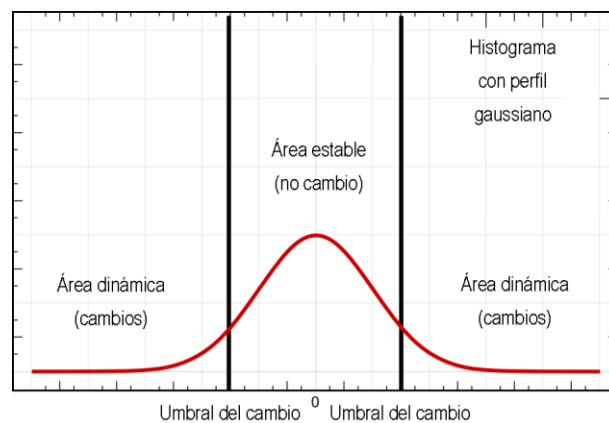


Figura 6: Histograma de las imágenes resultantes de la comparación (Elaboración propia).

La disposición del umbral de cambio es determinante. En ocasiones se establece visualmente, pero en la mayoría de los casos se determina mediante trabajo de campo o datos de apoyo auxiliares. Un aspecto importante a tener en cuenta es la consideración de posibles errores de omisión y comisión.

5.2.1.2 - DIFERENCIA DE INDICES ESPECTRALES

Un índice espectral puede definirse como aquel derivado de la combinación de valores de reflectancia de un pixel a distintas longitudes de onda que indica la abundancia relativa de un parámetro de interés. Pueden clasificarse en función de si son de banda ancha (valores de reflectancia derivados de imágenes multiespectrales) o de banda estrecha en los que los valores se derivan de imágenes hiperespectrales. Entre los más importante pueden destacarse los índices de vegetación, geológicos, índices de áreas quemadas, de nieve, agua etc.

Esta técnica se fundamenta en la diferencia de información cuantitativa, entre distintas fechas (además de utilizar bandas espectrales). Pueden ser aplicados tanto a imágenes post incendio como a un conjunto de imágenes con un enfoque multitemporal. En el presente estudio se ha utilizado el segundo enfoque y han sido estimados índices de vegetación (NDVI -Normalized Difference Vegetation Index- y NDII -Normalized Difference Infrared Index-) y un índice específico para áreas quemadas, NBR -Normalized Burnt Ratio-.

Para la estimación de éstos, se parte inicialmente de las composiciones pre - post incendio y la aniversario - post incendio. En ellas, se sustituye cada región del espectro por su banda correspondiente. En primer lugar, se calcula el valor del índice espectral para la imagen pre - incendio o aniversario y a continuación se realiza el mismo procedimiento para la posterior al incendio. Una vez realizada esta estimación se calcula la diferencia entre las dos imágenes creadas anteriormente.

Los índices espectrales calculados en el presente trabajo así como la metodología empleada para ello, se describen a continuación:

NDVI (Rouse *et al.*, 1974): este índice es muy útil para detectar cambios debido a la deforestación, aunque sus resultados dependen mucho del entorno. En estos casos, resulta de interés la utilización de imágenes aniversario con el objetivo de minimizar las diferencias en el ciclo fenológico de las cubiertas. En su estimación se utilizan las bandas del Rojo (R) y del Infrarrojo cercano (IRc).

$$NDVI = \frac{(\rho IRc - \rho R)}{(\rho IRc + \rho R)}$$

Dónde:

ρIRc : reflectancia en la banda del IRc.

ρR : reflectancia en la banda del Rojo.

NDII (Hunt & Rock, 1989): índice de vegetación muy sensible al contenido del agua de las cubiertas vegetales, por lo que también es muy útil para detectar cambios en el ámbito forestal. Se calcula a partir de las bandas del Infrarrojo cercano (IRc) y del Infrarrojo medio de onda corta (IRm 1).

$$NDII = \frac{(\rho IRc - \rho IRm 1)}{(\rho IRc + \rho IRm 1)}$$

Dónde:

ρIRc : reflectancia en la banda del IRc.

ρIRm : reflectancia en la banda del IRm 1.

NBR (Lopez & Caselles, 1991): conocido también como el cociente normalizado de área quemada (Manzo & López, 2013), está especialmente diseñado para detectar zonas quemadas. Su intervalo de variación se encuentra normalizado (valores comprendidos entre -1 y +1) y la estimación de él se realiza mediante las bandas del Infrarrojo cercano (IRc) y del Infrarrojo medio de onda corta (IRm 2), siguiendo esta expresión:

$$NBR = \frac{(\rho IRc - \rho IRm 2)}{(\rho IRc + \rho IRm 2)}$$

Dónde:

ρIRc : reflectancia en la banda del IRc.

ρIRm : reflectancia en la banda del IRm 2.

5.2.1.3 - COMPONENTES PRINCIPALES (CP)

El Análisis de Componentes Principales es una técnica cuyo objetivo es resumir la información contenida en un grupo amplio de variables (bandas originales) en un nuevo conjunto más pequeño, sin perder una parte significativa de esa información. Esta capacidad de síntesis ha sido la base de la aplicación del ACP en teledetección (Chuvieco, 2002).

Las nuevas bandas creadas denominadas Componentes Principales (CP) son independientes entre sí y recogen y reorganizan la información original. Se trata de un método de especial interés para este tipo de estudios ya que las imágenes multitemporales correspondientes a una misma zona, contienen información redundante en todas aquellas áreas en las que no se hayan producido cambios.

En detección de cambios, las bandas de entrada que se utilizan para el ACP son las bandas de interés de las imágenes de las dos o tres fechas entre las que se desea detectar cambios. Así, en la primera o primeras CP se recoge información común a todas las bandas que intervienen en el análisis (común a las dos o tres fechas de las imágenes de entrada). Por el contrario, en la segunda o tercera CP se recoge la información que no es común a todas las bandas (fechas) que intervienen en el análisis y representarían zonas de cambio de cubiertas.

En el caso de la discriminación multitemporal de los incendios, para cada fecha se puede seleccionar el CP más relacionado con la vegetación. De este modo, utilizando técnicas de detección de cambios, se realzan las zonas que han sufrido cambios en la vegetación.

El proceso de obtención de los Componentes Principales se detalla a continuación:

En primer lugar, a partir de la matriz de varianza-covarianza de las bandas que componen la imagen original se extraen los autovalores (eigenvalores) que expresan la proporción de la información original que retienen. En este sentido, este dato resulta de gran interés para decidir que componentes principales retienen más información original y por lo tanto para decidir que Componente Principal es más interesante. El siguiente paso es calcular los autovectores (eigenvectores), que equivalen a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo las bandas de la imagen las variables independientes y los CP las dependientes.

A partir de los autovectores se calcula la matriz de correlación entre CP y bandas de la imagen. Por último, se obtiene una imagen de los componentes principales, pudiéndose representar estos en blanco y negro o en color.

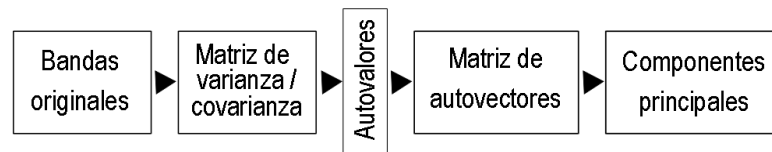


Figura 7: Proceso de cálculo para la obtención de los componentes principales de una imagen (Elaboración propia).

Para la aplicación de esta técnica, se ha generado un archivo multitemporal con las bandas correspondientes a las dos fechas. Es decir, se ha determinado sobre imágenes con combinaciones de fecha (pre - post incendio y aniversario - post incendio.).

5.2.2 - TÉCNICAS BASADAS EN INFORMACIÓN CUALITATIVA

Tal y como se ha comentado en los antecedentes, tanto las clasificaciones supervisadas como no supervisadas se han empleado en la cartografía de incendios forestales.

Como último método analizado en el presente estudio, se ha realizado una clasificación no supervisada para identificar las distintas categorías que aparecen en la imagen, definir su comportamiento espectral y asignar cada pixel a aquella categoría con la que más similitud presente. La aplicación de este tipo de clasificación no requiere un conocimiento previo del comportamiento de las categorías o clases a discriminar, es decir, no requiere trabajo de campo previo pero si es necesario definir las correspondencias entre grupos de pixeles y categorías.

Se trata de un proceso meramente estadístico que agrupa pixeles con similar comportamiento espectral, por ello su objetivo principal es definir las clases espectrales presentes en la imagen.

Como algoritmo estadístico de clasificación no supervisada se ha utilizado el algoritmo *K- Means* que permite agrupar los píxeles de la imagen en *k* clases en función de su distancia espectral al centroide o valor medio de cada clase.

Este método se ha aplicado sobre la composición multitemporal de las imágenes pre – post incendio (presenta mejor resultado en la discriminación de las cubiertas) unida al índice NBR. El número de grupo en los que finalmente se ha decidido clasificar la imagen es de 25, ya que proporciona mejores resultados que un número menor. Del mismo modo, se han analizado las estadísticas de cada clase para ver las zonas de cambio.

5.2.3 - ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS RESULTADOS. MATRIZ DE CONFUSIÓN

Se considera necesario determinar la bondad de cada técnica de forma cuantitativa. Para cuantificar cómo de precisas son las estimaciones de áreas quemadas realizadas es necesario disponer de información de referencia que permita compararla con los resultados que proporciona cada uno de los métodos empleados.

En este caso, se han cotejado los resultados obtenidos al establecer los umbrales de las regiones de interés (ROI) con la información relativa a la cartografía proporcionada por *Copernicus*. La comparación de los resultados de áreas quemadas que proporciona cada técnica con la información de referencia, se organiza en matrices de confusión.

Si existen un total de *k* clases posibles, la matriz de confusión será de tamaño *k* x *k*. En las columnas se muestran las categorías de referencia (verificación), mientras que en las filas indican las categorías de los resultados. Las entradas situadas en la diagonal (*akk*) de la matriz representan los píxeles correctamente verificados, mientras que las entradas fuera de la diagonal son errores de clasificación, asignados a otra clase.

En una matriz con *k=2*, en la que una de las clases se considera como clase positiva (P) y la otra como clase negativa (N), cada uno de los resultados puede pertenecer a una de estas cuatro categorías:

- Verdadero positivo (VP): representa la proporción de píxeles identificados dentro de la clase P (incendio) y pertenecen a zonas quemadas.
- Verdadero negativo (VN): píxeles catalogados como área no quemada y que en realidad no están afectados por el incendio.
- Falso positivo (FP): en esta categoría se engloban los píxeles identificados como área no quemada pero que en realidad si pertenecen a la clase definida como incendio.
- Falso negativo (FN): proporción de píxeles categorizados como incendio y en la información de referencia no pertenecen al área quemada.

Tabla 5: Matriz de confusión para una matriz con *k = 2*.

CLASIFICACIÓN	VERDAD TERRENO (Referencia)	
	Clase N (No incendio)	Clase P (Incendio)
Clase N (No incendio)	VN	FP
Clase P (Incendio)	FN	VP

A partir de estas cuatro categorías es posible calcular multitud de estadísticas o índices de calidad. En el presente estudio se han considerado los siguientes:

1. Fiabilidad global (FG) o exactitud: representa el porcentaje de píxeles bien categorizados respecto al total de píxeles verificados.

$$E = (VP + VN)/(VP + FP + FN + VN)$$

2. Estadístico Kappa (k): grado de fiabilidad debida exclusivamente a la exactitud de la predicción, prescindiendo de factores aleatorios. Mide la diferencia entre el acuerdo observado (resultados de la clasificación) y el que cabría esperar únicamente por azar.

$$k = (\text{observado} - \text{esperado})/(1 - \text{esperado})$$

3. Precisión: es la proporción de píxeles identificados correctamente como área quemada frente al total de discriminados para esa categoría.

$$P = VP/(VP + FN)$$

4. Tasa de Verdaderos Positivos o sensibilidad (TVP): es la porción de píxeles catalogados correctamente como área quemada entre todos los posibles para la clase de referencia incendio.

$$TVP = VP/(VP + FP)$$

5. Tasa de Verdaderos Negativos o especificidad (TVN): representa la proporción de píxeles correctamente categorizados como no incendio.

$$TVN = VN/(VN + FP)$$

El proceso metodológico se ha desarrollado mediante el software de procesamiento y análisis avanzado de imágenes geoespaciales ENVI.

6 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el presente trabajo. Al igual que se ha realizado en el apartado 5.1 - Pre - procesamiento de las imágenes, se muestran los resultados (imágenes) obtenidos para el incendio forestal situado en Castellón y la información cuantitativa para todos ellos. El resto puede consultarse en el documento Anexo.

6.1 - MÉTODOS UNITEMPORALES

6.1.1 - REFLECTANCIA POST – INCENDIO

El histograma de reflectancia para la imagen post - incendio se ha determinado para el intervalo comprendido entre los valores 600 y 1200. El eje X representa los valores de reflectancia (adimensional). Al tratarse de este parámetro e imágenes Landsat, el valor se ha dividido entre 10000. Por lo que la zona quemada se engloba dentro del intervalo de valores de reflectancia 0,06 – 0,12. Se han definido umbrales de reflectancia en diferentes bandas del espectro (infrarrojo medio) pero finalmente se ha determinado realizarlo sobre la banda relativa al infrarrojo cercano (IRc) ya que proporciona mejores resultados.

Para determinar el área afectada por el incendio forestal se han minimizado en la medida de lo posible, tanto los errores de comisión como los de omisión. Una vez establecido el umbral, se observa como delimita de forma correcta la zona afectada por el incendio forestal.

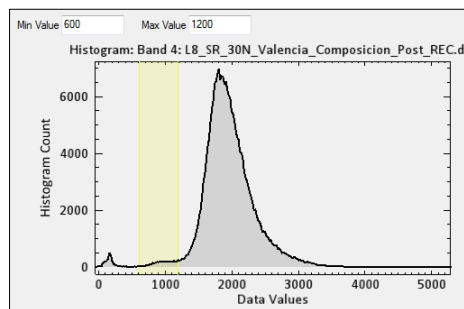


Figura 8: Histograma de reflectancia para la imagen post – incendio y umbral de área quemada (Incendio 1: situado en Castellón).

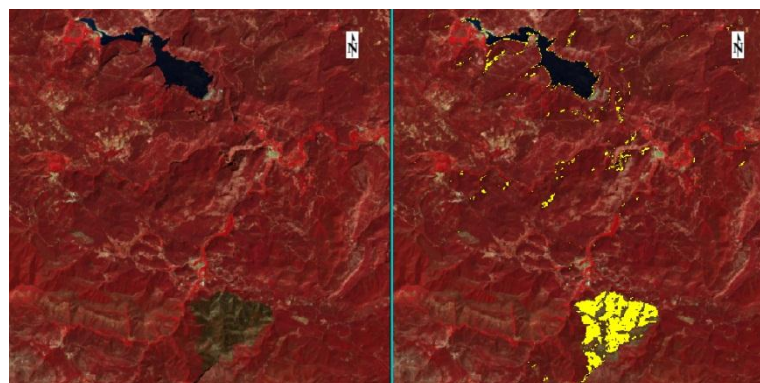


Figura 9: Imagen post – incendio (superior) y umbral de reflectancia definido para la zona quemada (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).

Analizando la Figura 9, en la zona próxima al embalse aparecen píxeles aislados discriminados como área quemada que no lo son. Del mismo modo, en el interior del área quemada se observa como hay píxeles verdaderamente quemados que no han sido identificados (error de omisión)

Tabla 6: Estadísticas calculadas para el umbral de reflectancia de la imágenes post – incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
	Post - incendio	Post - incendio
Fiabilidad global (%)	81,91	82,16
Estadístico Kappa (k)	0,65	0,47
Precisión	0,97	0,97
Sensibilidad (TVP)	0,69	0,39
Especificidad (TVN)	0,72	0,80

Los resultados derivados de la estimación de la matriz de confusión (Tabla 7) muestran valores de fiabilidad global igual a 81,91 % y 82,16 %, para el incendio de Castellón y Cáceres, respectivamente. El resultado representa que el número total de píxeles categorizados correctamente respecto al total de verificados es elevado.

El estadístico *kappa* oscila entre 0 - 1. Para el umbral definido en la imagen post-incendio, el valor medio es igual a 0,55, aproximadamente. Así, el grado de fiabilidad prescindiendo de factores aleatorios es medio-bajo para ambos.

La proporción de píxeles discriminados como área quemada frente al total de identificados dentro de la categoría incendio (precisión) presenta un valor elevado, 0,97. Destacar que éste es el mismo para los dos incendios estudiados.

La sensibilidad o TVP es mayor para el incendio de Castellón que para el de Cáceres (0,69 vs 0,39). Tomando como referencia estos valores, la proporción de píxeles identificados como área quemada y que realmente pertenecen a esa categoría no es totalmente significativa, ya que los valores no están muy próximos a 1 (valor máximo). Del mismo modo, un bajo valor de la Tasa de Verdaderos Positivos indica que el error de omisión que se ha producido es elevado. Lo que implica que hay un porcentaje elevado de píxeles realmente quemados y que no han sido identificados.

Los píxeles categorizados como no incendio (áreas no quemadas) y que en realidad no están afectados por el incendio muestran valores de 0,72 (Castellón) y 0,80 (Cáceres). Cuanto mayor es la Tasa de Verdaderos Negativos, menores son los errores de comisión producidos al discriminar el área quemada.

Las dos comparaciones multitemporales de imágenes analizadas muestran valores similares para todos los índices de calidad estudiados. Las únicas excepciones se presentan para el caso de la sensibilidad y el estadístico *kappa*, cuyos valores son significativamente menores para el incendio de Cáceres.

6.2 - MÉTODOS MULTITEMPORALES

6.2.1 - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA

Los resultados obtenidos para las diferencias de reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano, infrarrojo medio de onda corta 1 e infrarrojo medio de onda corta 2, se exponen a continuación:

6.2.1.1 - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRARROJO CERCANO (IRc)

En la Figura 10 se observan los histogramas de reflectancia definidos para la técnica diferencia de reflectancia (en la banda del IRc) y el umbral de área quemada. Para la imagen multitemporal pre – post incendio los valores de reflectancia se encuentran en el intervalo 0,05 – 0,25 y en la combinación de imágenes aniversario – post incendio los valores oscilan entre 0,03 y -0,50.

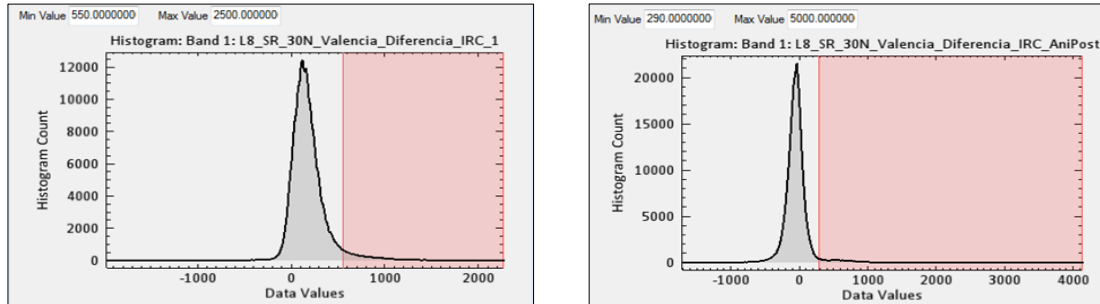


Figura 10: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

En la Figura 11 se exponen los resultados relativos al umbral de área quemada definido para la imagen diferencia de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano. En la parte superior se muestra la combinación multitemporal de imágenes pre-post incendio y aniversario – post incendio (inferior).

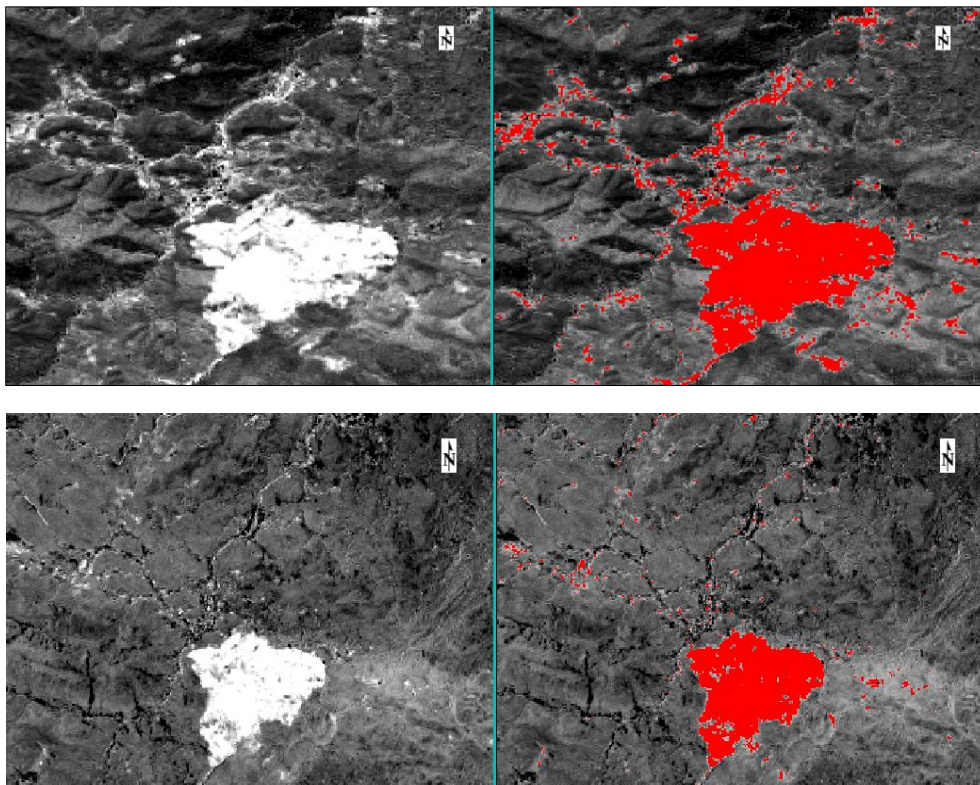


Figura 11: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).

Los resultados derivados del análisis de calidad se muestran en la Tabla 8:

Tabla 7: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Incendio Castellón	Incendio Cáceres	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
Fiabilidad global (%)	86,88	83,2	91,97	81,65
Estadístico <i>Kappa</i> (<i>k</i>)	0,74	0,58	0,84	0,54
Precisión	0,90	0,72	0,95	0,70
Sensibilidad (TVP)	0,86	0,67	0,91	0,64
Especificidad (TVN)	0,83	0,87	0,89	0,86

En lo relativo al umbral de reflectancia definido para la banda del infrarrojo cercano y tomando como referencia el incendio situado en Castellón, la combinación multitemporal de imágenes que permite una mejor discriminación del área quemada es la formada por las imágenes aniversario y post incendio. Por el contrario, en el incendio de Cáceres es la formada por la combinación pre-post incendio.

Los resultados derivados de la matriz de confusión muestran en todos los casos estudiados, valores de fiabilidad global elevados (siendo el mayor de todos, el obtenido para el incendio de Castellón - 91,97 % -). Así, el número total de píxeles categorizados correctamente respecto al total de verificados es elevado. En la misma línea, el estadístico *kappa* presenta un valor significativamente mayor en este caso.

La proporción de píxeles discriminados como área quemada frente al total de identificados dentro de la categoría incendio presenta un valor elevado en el caso del incendio localizado en Castellón (0,90 aproximadamente). Por el contrario, en el incendio extremeño, los valores de precisión son de 0,70.

Del mismo modo, la sensibilidad o TVP es mayor para el incendio de Castellón que para el de Cáceres (0,86 y 0,91 vs 0,67 y 0,64). Así, la proporción de píxeles identificados como área quemada y que realmente pertenecen a esa categoría es totalmente significativa para este incendio, al encontrarse los valores próximos a 1. Al tratarse de un valor elevado, los errores de omisión que se han producido son bajos.

Los píxeles categorizados como áreas no quemadas y que en realidad no están afectados por el incendio (especificidad) muestran todos ellos un valor medio de 0,85 aproximadamente. La relación entre el anterior índice de calidad y el error de comisión es inversamente proporcional, por lo que este porcentaje es bajo.

6.2.1.2 - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRARROJO MEDIO DE ONDA CORTA (IRm 1)

Los valores de los umbrales de reflectancia para la imagen diferencia (combinación pre – post incendio y aniversario – post incendio) son -7,00– -0,001 y -2,00– -0,0001, respectivamente.

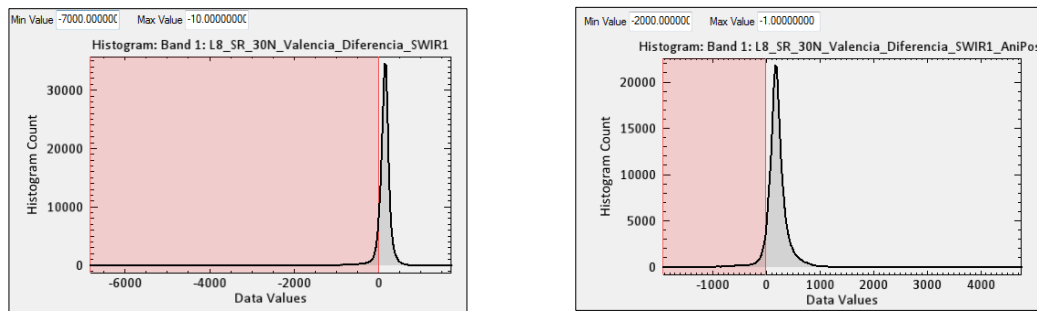


Figura 12: Histogramas reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

En la Figura 12 se muestran los resultados relativos al umbral de área quemada definido para la imagen diferencia de reflectancia en la banda del IRm 1. En la parte superior se muestra la combinación multitemporal de imágenes pre-post incendio y aniversario – post incendio (inferior).

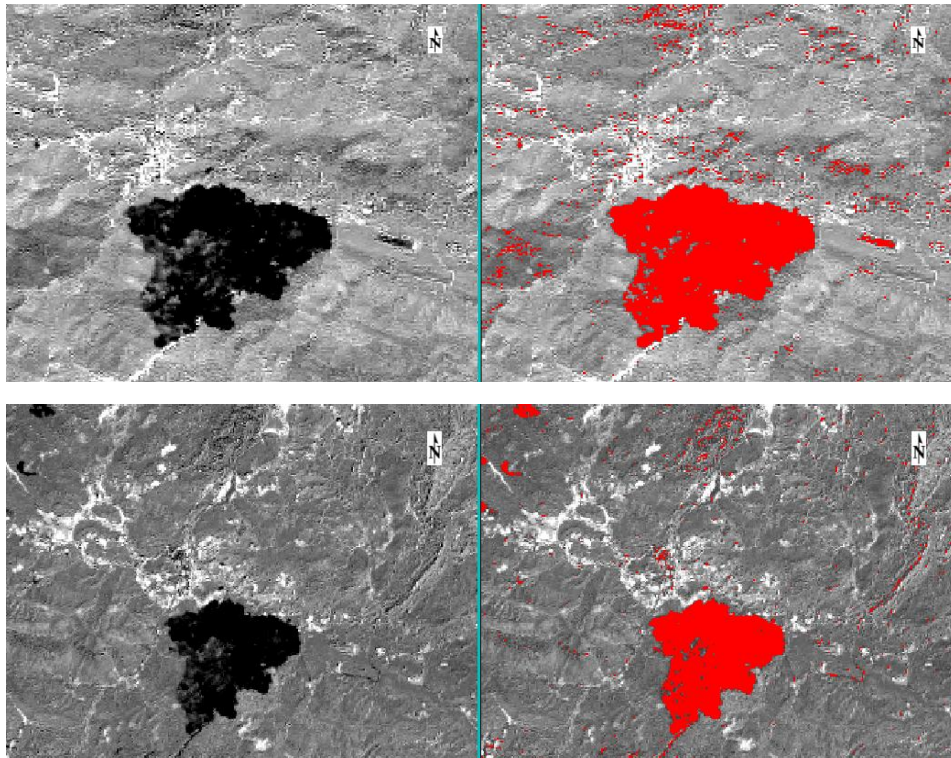


Figura 13: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).

Las estadísticas calculadas para la imagen diferencia de reflectancia en la banda del IRm 1 se muestran a continuación:

Tabla 8: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Incendio Castellón	Incendio Cáceres	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
Fiabilidad global (%)	90,82	62,43	91,27	66,78
Estadístico Kappa (k)	0,81	0,17	0,82	0,27
Precisión	0,91	0,39	0,69	0,44
Sensibilidad (TVP)	0,92	0,52	0,97	0,62
Especificidad (TVN)	0,90	0,78	0,98	0,82

El aspecto más importante derivado del análisis para la banda del infrarrojo medio de onda corta 1 son los resultados obtenidos para el incendio forestal extremeño. Todos sus índices de calidad presentan valores claramente menores a los que presenta el otro incendio forestal estudiado. El valor inferior a 0,65 correspondiente a las sensibilidades indica una baja proporción de píxeles discriminados correctamente como área quemada. Además, en las imágenes correspondientes a este análisis presentadas en el Anexo puede determinarse de forma visual que el umbral de área quemada no delimita de forma correcta ésta.

Para el incendio situado en Castellón, la combinación multitemporal Aniversario – post incendio proporciona una mayor discriminación de la zona quemada. El número total de píxeles categorizados correctamente respecto al total de verificados es elevado, 91,27 %. Los valores de las estadísticas relativas a la sensibilidad y la especificidad se encuentran muy próximos a 1 (valor máximo). Debido a la relación inversa entre los índices de calidad anteriores y los errores de omisión y comisión, éstos presentan valores bajos para los resultados obtenidos.

6.2.1.3 - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRARROJO MEDIO DE ONDA CORTA (IRm 2)

Los valores de los umbrales de reflectancia para la imagen diferencia (combinación pre – post incendio y aniversario – post incendio) son -2,00 – -0,28 y -8,00 – -0,008, respectivamente.

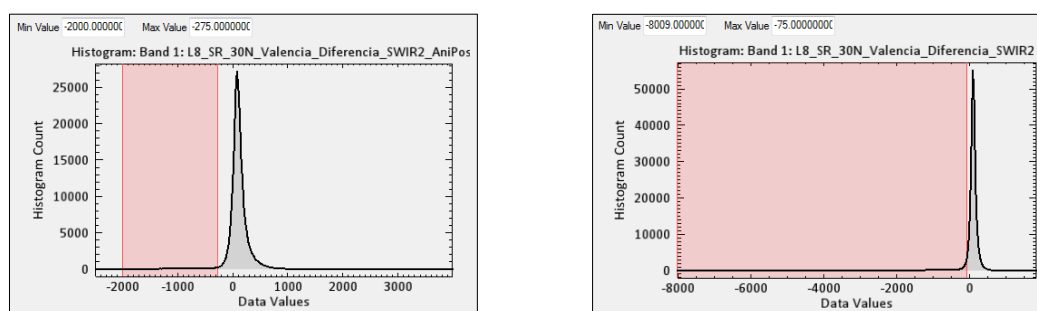


Figura 14: Histogramas reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

La Figura 15 muestra los umbrales de área quemadas definidos en la banda del IRm 2.

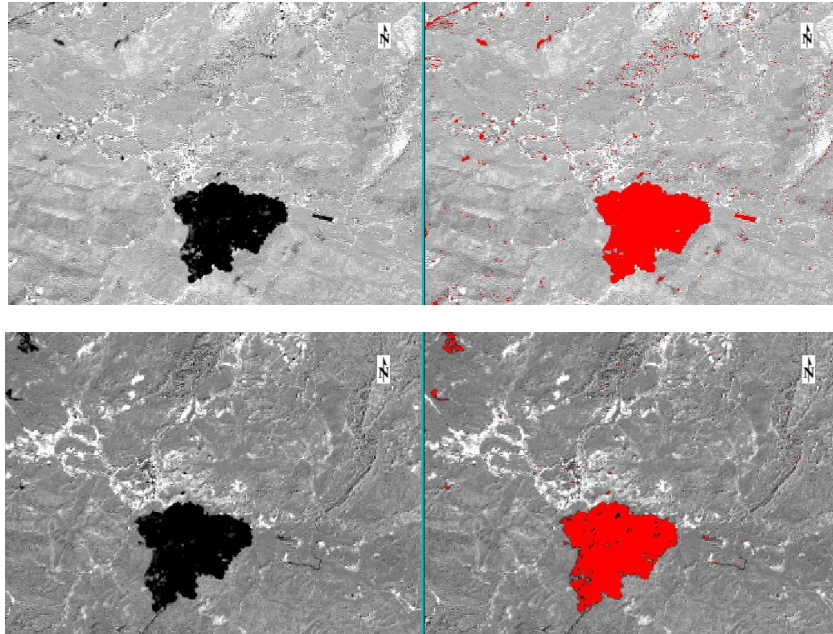


Figura 15: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).

Los resultados derivados de la matriz de confusión relativos a la banda del infrarrojo medio de onda corta se recogen en la Tabla 10.

Tabla 9: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Incendio Castellón	Incendio Cáceres	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
Fiabilidad global (%)	94,51	84,48	93,21	66,78
Estadístico Kappa (k)	0,89	0,60	0,86	0,27
Precisión	0,92	0,77	0,95	0,44
Sensibilidad (TVP)	0,99	0,65	0,93	0,65
Especificidad (TVN)	0,98	0,87	0,91	0,82

Si se comparan las dos composiciones multitemporales de imágenes, la formada por la combinación pre-post para el incendio de Castellón delimita significativamente mejor el área quemada. Debido principalmente al elevado porcentaje de píxeles bien categorizados (94,51 %). Del mismo modo, la sensibilidad y especificidad son igual a 0,99 y 0,98, respectivamente. Este aspecto implica que todos los píxeles clasificados como área quemada y aquellos catalogados como no incendio, realmente pertenecen a la categoría asignada.

La combinación formada por las imágenes aniversario y post incendio refleja peores resultados para el incendio localizado en Cáceres. Su fiabilidad global es igual a 66,78 % mientras que para la composición multitemporal pre-post incendio es más elevada 84,48 %.

Los resultados obtenidos al definir los umbrales de áreas quemadas en la técnica diferencia de reflectancia indican como la calculada en la banda del IRm 2 discrimina de forma más precisa la zona afectada por el incendio. En la detección de cambios producidos por incendios forestales, ésta región del espectro presenta una mayor separabilidad en esta tipología de cambio. La combinación de imágenes

MEMORIA

pre-post ofrece mejores resultados para el incendio de Cáceres y la formada por las imágenes aniversario-post incendio en incendio situado en Castellón, excepto para la banda del IRm 2.

6.2.2 - DIFERENCIA DE ÍNDICES ESPECTRALES

6.2.2.1 - ÍNDICE ESPECTRAL NDVI

En la Figura 16 se observan los histogramas de reflectancia definidos en el índice espectral NDVI y el umbral de área quemada. Para la imagen multitemporal pre – post incendio los valores de reflectancia se encuentran en el intervalo 0,000016 – 0,0002 y en la combinación de imágenes aniversario – post incendio los valores oscilan entre 0,000054 y 0,0001.

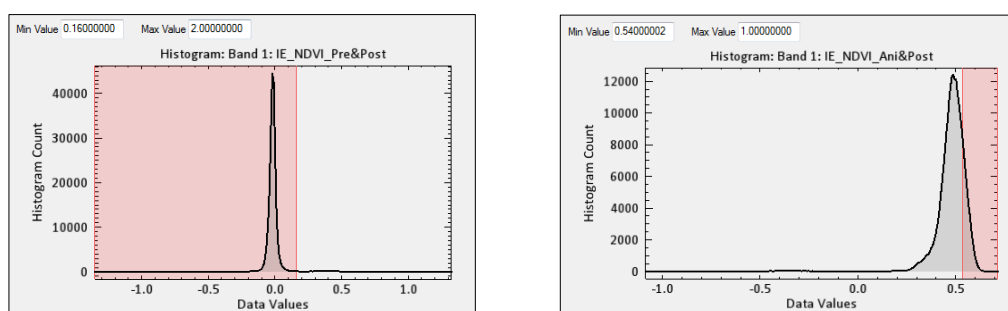


Figura 16: Histogramas reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

En la Figura 17 se observa como en la combinación multitemporal de imágenes aniversario-post incendio no se ha podido establecer el umbral para el área quemada.

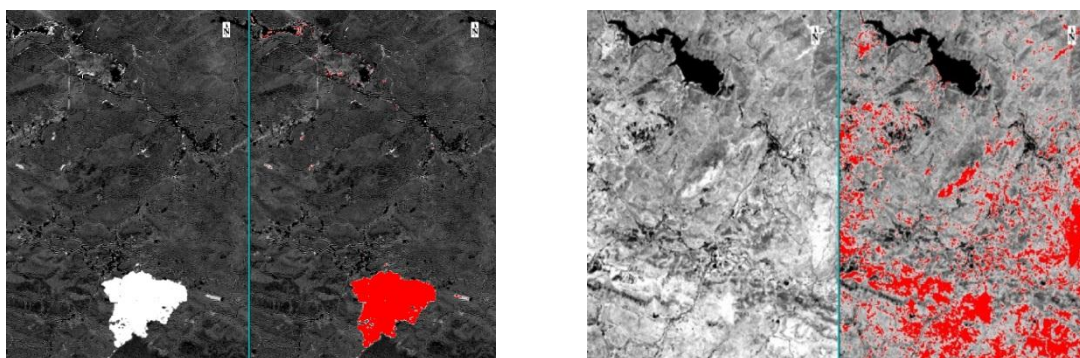


Figura 17: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

En la Tabla 11 se presentan las estadísticas calculadas para el índice espectral NDVI.

Tabla 10: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Incendio Castellón	Incendio Cáceres	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
Fiabilidad global (%)	95,50	86,47	43,16	75,15
Estadístico Kappa (k)	0,92	0,62	-0,12	0,36
Precisión	0,96	0,94	0,49	0,58
Sensibilidad (TVP)	0,97	0,57	0,38	0,47
Especificidad (TVN)	0,96	0,85	0,39	0,80

En lo relativo al índice espectral NVDI, se puede delimitar tanto visualmente como de forma cuantitativa como la combinación multitemporal pre-post incendio delimita significativamente mejor el área quemada para los dos incendios analizados. En concreto, para el caso de Castellón, la fiabilidad global es de 95,50 %. Esto, significa que el número de píxeles bien categorizados es muy elevado. El grado de fiabilidad prescindiendo de factores aleatorios (estadístico *Kappa*) muestra un valor de 0,92. Es importante destacar el valor negativo de Kappa, en la otra combinación de imágenes debido principalmente a la mala definición del área quemada.

La precisión indica que la proporción de píxeles identificados como área quemada frente al total discriminado es elevado, 0,96 y 0,94 tomando como referencia la combinación pre-post, ya que para la otra los valores son aproximadamente la mitad de los anteriores.

La TVP más elevada se corresponde con el incendio de Castellón (composición de imágenes pre-post). El valor (0,97) es significativamente mayor que los obtenidos en el resto. Por ello, y debido a la existencia de una relación inversamente proporcional entre el índice de calidad anterior y el error de omisión, el valor de éste es muy bajo (el número de píxeles realmente quemados que no fueron detectados es muy bajo).

En la misma línea, el mayor valor de especificidad es de 0,96. Así, los píxeles categorizados como áreas no quemadas y que en realidad no están afectados por el incendio (especificidad) es elevado y los errores de comisión bajos.

6.2.2.2 - ÍNDICE ESPECTRAL NDII

Los valores de los umbrales de reflectancia para la imagen diferencia (combinación pre – post incendio y aniversario – post incendio) son 0,000015 – 0,0002 y 0 – 0,0004, respectivamente.

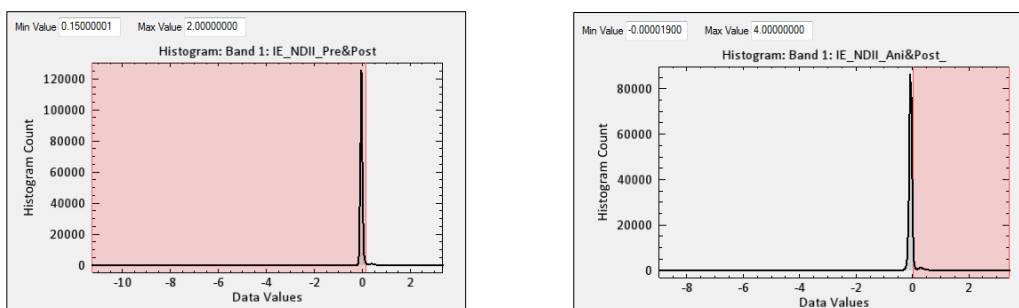


Figura 18: Histogramas de reflectancia definidos para la imagen diferencia del índice espectral NDII y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

MEMORIA

En la Figura 19 (inferior), correspondiente a la combinación multitemporal de imágenes aniversario – post incendio, se observa como el umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII no discrimina entre la cubierta afectada por el fuego y la correspondiente a agua (embalse).

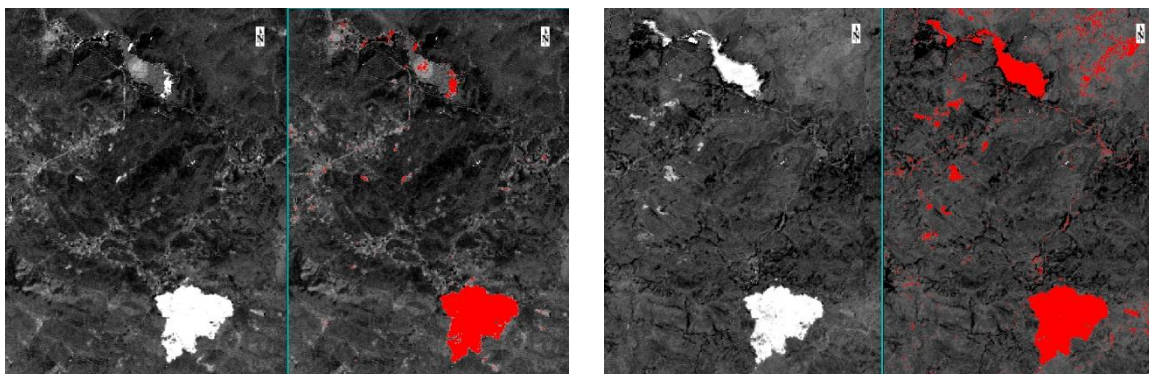


Figura 19: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).

Los resultados del análisis de calidad estimado para el índice espectral NDII, y las combinaciones multitemporales pre-post incendio y aniversario-post incendio aparece reflejado en la siguiente tabla (Tabla 12).

Tabla 11: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Incendio Castellón	Incendio Cáceres	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
Fiabilidad global (%)	95,45	86,78	93,66	80,31
Estadístico Kappa (k)	0,91	0,64	0,87	0,50
Precisión	0,95	0,92	0,90	0,68
Sensibilidad (TVP)	0,98	0,59	0,99	0,59
Especificidad (TVN)	0,97	0,86	0,91	0,84

Si se comparan las dos composiciones multitemporales de imágenes, la formada por la combinación pre-post para el incendio de Castellón delimita significativamente mejor el área quemada. Debido principalmente al elevado porcentaje de píxeles bien categorizados (95,45 %). En lo referente a este incendio, la sensibilidad y especificidad son igual a 0,98 y 0,99, respectivamente. Este aspecto implica que todos los píxeles clasificados como área quemada y aquellos catalogados como no incendio, realmente pertenecen a la categoría asignada. De este modo, los errores de comisión y omisión al discriminar la zona afectada por el incendio forestal son muy bajos.

Por otro lado, los resultados obtenidos para el incendio de Cáceres muestran una elevada fiabilidad global pero menor que los obtenidos en el caso anterior. Los errores de omisión producidos son elevados ya que su Tasa de Verdaderos Positivos es de 0,59 para ambas combinaciones de imágenes.

La combinación formada por las imágenes aniversario y post incendio refleja peores resultados para el incendio localizado en Cáceres. Su fiabilidad global es igual a 66,78 % mientras que para la composición multitemporal pre-post incendio es más elevada 84,48 %.

6.2.2.3 - ÍNDICE ESPECTRAL NBR

La Figura 20 muestra el umbral de reflectancia establecido para el índice espectral NBR. Combinación multitemporal de imágenes pre-post incendio (superior) y aniversario-post incendio (inferior).

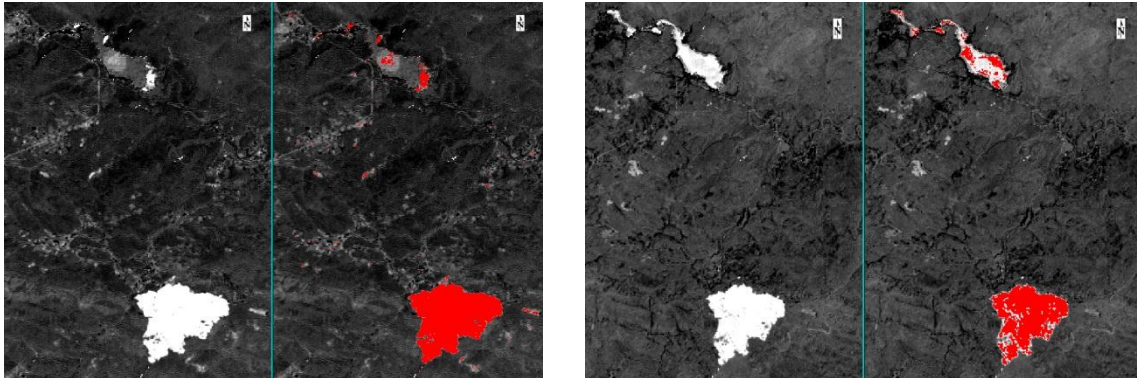


Figura 20: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 1: situado en Castellón).

Los valores de los umbrales de reflectancia definidos (combinación pre – post incendio y aniversario – post incendio) son 0,00019 – 0,0001 y 0,00038 – 0,0002, respectivamente.

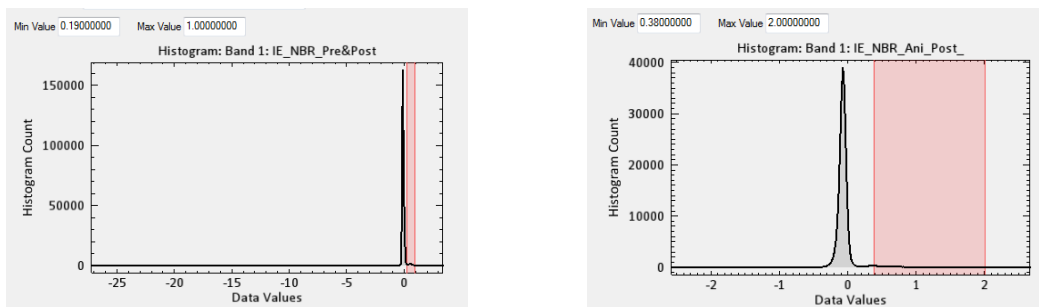


Figura 21: Histogramas de reflectancia definidos para la imagen diferencia del índice espectral NBR y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

La Tabla 13 muestra las estadísticas calculadas para la imagen diferencia del índice espectral NBR:

Tabla 12: Estadísticas calculadas para la imagen diferencia del índice espectral NBR y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Incendio Castellón	Incendio Cáceres	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
Fiabilidad global (%)	95,58	89,19	90,53	84,22
Estadístico Kappa (k)	0,91	0,71	0,81	0,61
Precisión	0,94	0,95	0,98	0,73
Sensibilidad (TVP)	0,98	0,66	0,85	0,71
Especificidad (TVN)	0,98	0,88	0,84	0,88

En lo relativo al umbral de reflectancia definido para el índice espectral NBR y tomando como referencia el incendio situado en Castellón, la combinación multitemporal de imágenes que permite una mejor discriminación del área quemada es la formada por las imágenes pre y post incendio. En el incendio de Cáceres es la misma.

Los resultados derivados de la matriz de confusión muestran en todos los casos estudiados, valores de fiabilidad global elevados (siendo mayores en el incendio de Castellón - 95,58 y 90,53 %). Así, el número total de píxeles bien categorizados respecto al total de verificados es elevado. En la misma línea, el estadístico *kappa* presenta un valor significativamente mayor para el incendio analizado anteriormente.

La proporción de píxeles discriminados como área quemada frente al total de identificados dentro de la categoría incendio presenta un valores aproximados de 0,96, mientras que para el incendio de Cáceres (combinación aniversario-post incendio) es más bajo, 0,73.

La TVP es mayor para el incendio de Castellón que para el de Cáceres (0,98 y 0,85 vs 0,66 y 0,71). El valor de la sensibilidad es inversamente proporcional al error de omisión. Por ello, los errores de omisión que se han cometido son más bajos en el incendio de Castellón.

En la misma línea, el mayor valor de especificidad corresponde al incendio de Castellón (0,98). Así, los píxeles categorizados como áreas no quemadas y que en realidad no están afectados por el incendio (especificidad) es elevado y los errores de comisión bajos.

El método de diferencia de índices espectrales cartografía de forma más satisfactoria el área quemada sobre la combinación multitemporal de imágenes pre-post incendio. El comportamiento anterior se observa en todos los incendios analizados. Del mismo modo, entre los índices considerados en el presente estudio, aquel que identifica de forma más precisa la zona afectada por el fuego es el NBR, ideado especialmente para detectar zonas forestales quemadas. La fiabilidad global para éste es la mayor obtenida entre todas las técnicas utilizadas (95,58 %).

6.2.3 - COMPONENTES PRINCIPALES (CP)

En la Figura 22 se observan los histogramas de reflectancia definidos para la técnica de Componentes Principales y el umbral de área quemada. Para la imagen multitemporal pre – post incendio los valores de reflectancia se encuentran en el intervalo 0,28 – 7,00 y en la combinación de imágenes aniversario – post incendio los valores oscilan entre -3,00 y -0,25.

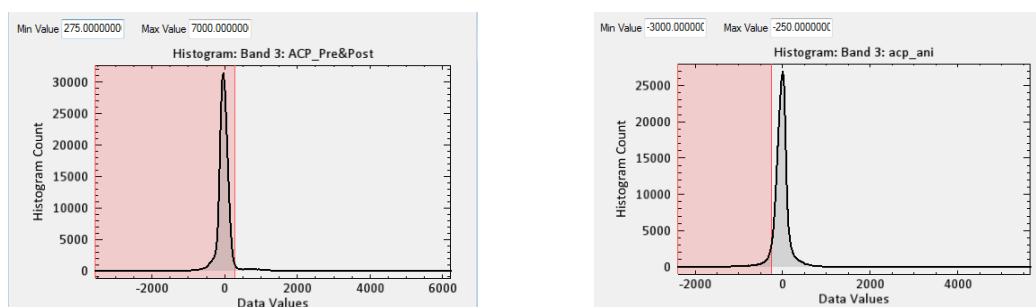


Figura 22: Histogramas de reflectancia definido para el ACP y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes multitemporales Pre – Post (izquierda) incendio y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

La Figura 23 (izquierda) muestra el resultado obtenido al realizar el Análisis de Componentes Principales, visualizado para las bandas 1, 2, 3 y 4 (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano). Además, en la imagen anterior se ha definido el umbral de área quemada (Figura 23, derecha). Del mismo modo, en la

Figura 24, se muestran los mismos resultados pero para la combinación multitemporal formada por las imágenes aniversario y post incendio.

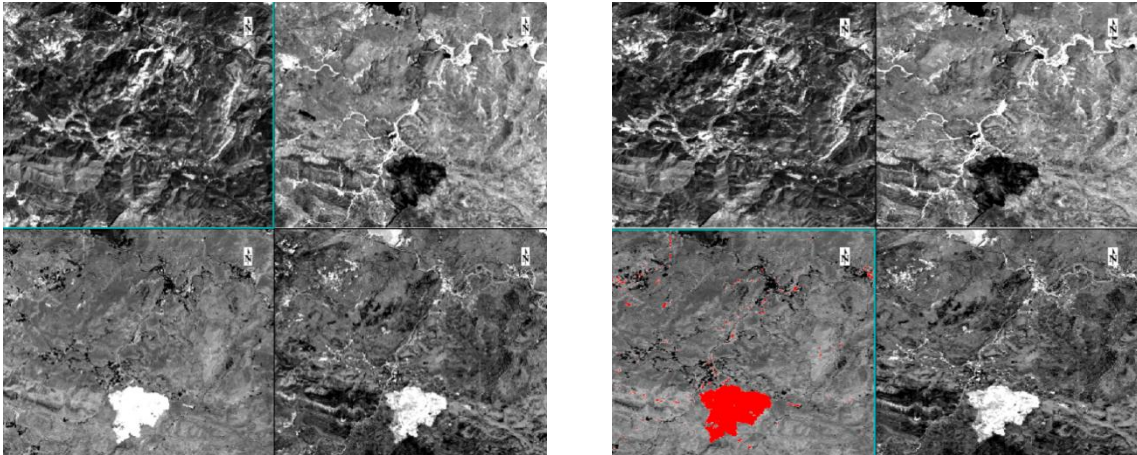


Figura 23: ACP aplicado a la combinación multitemporal pre – post incendio (izquierda) y umbral de área quemada (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

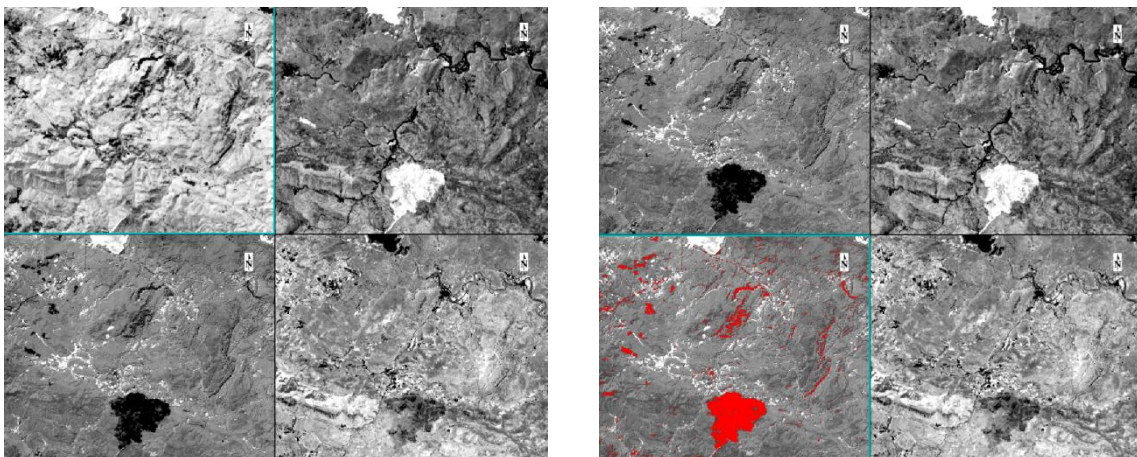


Figura 24: ACP aplicado a la combinación multitemporal Aniversario – Post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón).

La Tabla 14 muestra la matriz de autovalores (eigenvalores) y el porcentaje de varianza explicado por cada banda para las dos combinaciones de imágenes analizadas.

Los datos relativos a los autovectores o eigenvectores aparecen reflejados en las Tablas 15 y 16. Todos ellos derivados de las estadísticas de la imagen conjunta.

Tabla 13: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 1: situado en Castellón).

Incendio Castellón				
	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Eigenvalores	% varianza explicada	Eigenvalores	% varianza explicada
CP1	1492378,04	85,67	1598409,36	85,50
CP2	160126,97	9,19	130850,99	7,00
CP3	37083,04	2,13	74094,47	3,96
CP4	27372,7	1,57	38143,65	2,04
CP5	17706,84	1,02	18206,82	0,97
CP6	2780,91	0,16	4012,21	0,21
CP7	1941,86	0,11	2724,84	0,15
CP8	1385,46	0,08	1376,48	0,07
CP9	503,79	0,03	719,11	0,04
CP10	425,89	0,02	650,27	0,03
CP11	171,87	0,01	277	0,01
CP12	93,67	0,01	116,07	0,01

En las tablas que se muestran a continuación (matrices de eigenvectores) se comparan los valores de los eigenvectores entre las dos imágenes utilizadas en cada combinación multitemporal, para todas las bandas. Así, las bandas del 1 al 6 corresponden al Azul, Verde, Rojo, IRc, IRm1 e IRm2 de la imagen pre – incendio o aniversario. Y las bandas del 7 al 12 corresponden a las mismas bandas del espectro pero relativas a la imagen post - incendio.

Tabla 14: Eigenvectores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 1: situado en Castellón).

Eigenvectores	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12
Band 1 CP1	0.09	0.15	0.22	0.28	0.45	0.38	0.07	0.13	0.20	0.25	0.47	0.39
Band 2 CP2	-0.07	-0.08	-0.12	0.65	-0.04	-0.19	-0.07	-0.07	-0.13	0.63	-0.12	-0.28
Band 3 CP3	-0.23	-0.32	-0.41	0.18	-0.10	-0.32	-0.12	-0.22	-0.14	-0.21	0.47	0.44
Band 4	0.16	0.21	0.17	0.27	-0.55	-0.32	0.23	0.30	0.40	-0.06	-0.08	0.33
Band 5	0.09	0.09	0.16	0.61	0.19	0.11	-0.06	-0.21	-0.11	-0.64	-0.26	-0.04
Band 6	0.26	0.41	0.03	-0.01	0.16	-0.47	0.03	0.17	-0.19	-0.14	0.51	-0.42
Band 7	-0.37	-0.33	-0.10	0.07	0.33	-0.16	0.14	0.26	0.61	-0.18	0.02	-0.34
Band 8	-0.04	-0.18	0.68	-0.08	-0.08	-0.23	-0.31	-0.49	0.23	0.08	0.17	-0.07
Band 9	0.64	-0.42	-0.10	-0.01	0.05	-0.02	0.54	-0.31	0.09	0.03	0.04	-0.07
Band 10	0.14	0.06	-0.00	-0.14	0.55	-0.54	-0.09	0.02	-0.02	0.13	-0.43	0.40
Band 11	0.45	0.09	-0.40	0.01	-0.04	0.11	-0.64	-0.06	0.44	-0.00	0.01	-0.07
Band 12	-0.27	0.56	-0.26	-0.06	0.03	-0.01	0.30	-0.60	0.29	0.06	-0.03	-0.01

Del análisis de las matrices anteriores, se determina que el Componente Principal 1 (CP1) explica casi el 86 % de la varianza total de las dos imágenes. Los eigenvectores presentan valores positivos para todas las bandas, por lo que recoge información relativa a todas las bandas/fechas. Por su parte, el CP2 explica aproximadamente el 9 % de la varianza total de las dos imágenes y los eigenvectores tienen coeficientes con igual signo entre bandas y fechas. Todas las bandas presentan coeficientes negativos excepto para el IRc en las dos fechas, por lo tanto recoge información de las bandas del IRc. Por último, el CP3 explica aproximadamente el 2 % de la varianza total de las dos

imágenes. Los eigenvectores presentan coeficientes de igual signo entre las bandas y fechas del visible. Entre las bandas del IRc e IRm presentan signo contrario, recogiendo así los cambios producidos en cubierta vegetal y agua.

En las primeras componentes puede observarse como recogen información común a todas las bandas que forman parte del análisis mientras que en la tercera CP se agrupa información no común a todas las fechas. De este modo, representan zonas de cambio de cubiertas.

Tabla 15: Eigenvectores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Aniversario – Post incendio (Incendio 1: situado en Castellón).

Eigenvectores	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12
Band 1 CP1	-0.08	-0.14	-0.22	-0.22	-0.50	-0.42	-0.07	-0.12	-0.19	-0.23	-0.44	-0.38
Band 2 CP2	0.12	0.09	0.11	-0.53	0.03	0.16	0.06	0.03	0.10	-0.75	0.08	0.27
Band 3 CP3	0.20	0.27	0.34	0.18	0.31	0.35	-0.01	-0.01	-0.12	-0.17	-0.52	-0.46
Band 4	-0.24	-0.33	-0.27	-0.29	0.51	0.17	-0.23	-0.33	-0.41	0.00	0.14	-0.18
Band 5	-0.16	-0.12	-0.08	0.73	0.03	-0.11	-0.11	-0.22	-0.13	-0.52	0.02	0.24
Band 6	-0.52	-0.47	0.07	-0.01	-0.06	0.37	0.08	0.08	0.46	0.01	-0.37	0.07
Band 7	-0.23	-0.01	-0.02	0.05	0.35	-0.40	0.10	0.38	0.34	-0.23	0.29	-0.50
Band 8	0.13	0.09	-0.72	0.06	0.20	0.10	0.28	0.43	-0.10	-0.02	-0.31	0.18
Band 9	0.21	-0.14	0.14	-0.11	0.47	-0.54	-0.01	-0.23	0.23	0.11	-0.41	0.34
Band 10	0.57	-0.39	-0.22	0.11	-0.07	0.15	0.31	-0.36	0.33	-0.06	0.16	-0.27
Band 11	0.08	0.28	-0.35	0.01	-0.02	0.11	-0.74	-0.09	0.47	-0.00	-0.04	-0.05
Band 12	-0.38	0.54	-0.18	-0.04	0.03	-0.00	0.44	-0.55	0.19	0.04	-0.01	-0.03

Para la matriz de eigenvectores de las imágenes aniversario-post incendio, el CP1 explica casi el 86 % de la varianza total de las dos imágenes. Los eigenvectores presentan valores negativos para todas las bandas, por lo que recoge información relativa a todas las bandas. El CP2 explica aproximadamente el 7% de la varianza total de las dos imágenes y los valores de los eigenvectores son todos positivos entre bandas y fechas. La única excepción se muestra en la banda del IRc cuyo signo es negativo para ambas fechas. Por su parte, el CP3 explica aproximadamente el 4 % de la varianza total de las dos imágenes. Los eigenvectores muestran coeficientes de signo contrario entre bandas y fechas.

En la misma línea seguida en los anteriores métodos, para el ACP se ha estimado la calidad de los resultados obtenidos (Tabla 17).

Tabla 16: Estadísticas calculadas para el ACP y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Incendio Castellón	Incendio Cáceres	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
Fiabilidad global (%)	94,31	89,48	91,39	85,66
Estadístico Kappa (k)	0,88	0,73	0,83	0,64
Precisión	0,93	0,87	0,93	0,77
Sensibilidad (TVP)	0,97	0,74	0,92	0,71
Especificidad (TVN)	0,97	0,90	0,90	0,89

Si se comparan los dos incendios, la estimación realizada para el situado en Castellón permite una mejor discriminación del área quemada. En lo relativo a las combinaciones multitemporales de imágenes, la composición pre-post incendio proporciona un porcentaje de píxeles bien categorizados más

MEMORIA

elevado. Analizando ésta, la sensibilidad y especificidad obtenidas son igual a 0,97. Este aspecto implica que todos los píxeles clasificados como área quemada y aquellos catalogados como no incendio, realmente pertenecen a la categoría asignada (minimizado así, los errores de omisión y comisión producidos al cartografiar el área quemada).

La combinación formada por las imágenes aniversario y post incendio refleja peores resultados para el incendio localizado en Cáceres. Su fiabilidad global es igual a 85,66 % mientras que para la composición multitemporal pre-post incendio es más elevada 89,48 %. Por ello, la combinación de imágenes pre-post incendio aporta mejores resultados al aplicar la técnica de Componentes Principales.

La proporción de píxeles discriminados como área quemada frente al total de identificados dentro de la categoría incendio presenta valores elevados en todos los casos, siendo los valores de precisión 0,9 aproximadamente. La única excepción (valor igual a 0,71) se muestra para la combinación aniversario – post del incendio forestal de Cáceres.

6.2.4 - CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

La clasificación no supervisada mediante el algoritmo iterativo *k-means* se ha realizado sobre las dos combinaciones de imágenes multitemporales. Como parte de la metodología, se han realizado varias clasificaciones con diferentes números de clases. Finalmente, el número de clases en las que se ha dividido la imagen ha sido de 25 ya que proporciona una mejor separabilidad. El número máximo de iteraciones utilizado ha sido de 15. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 25.

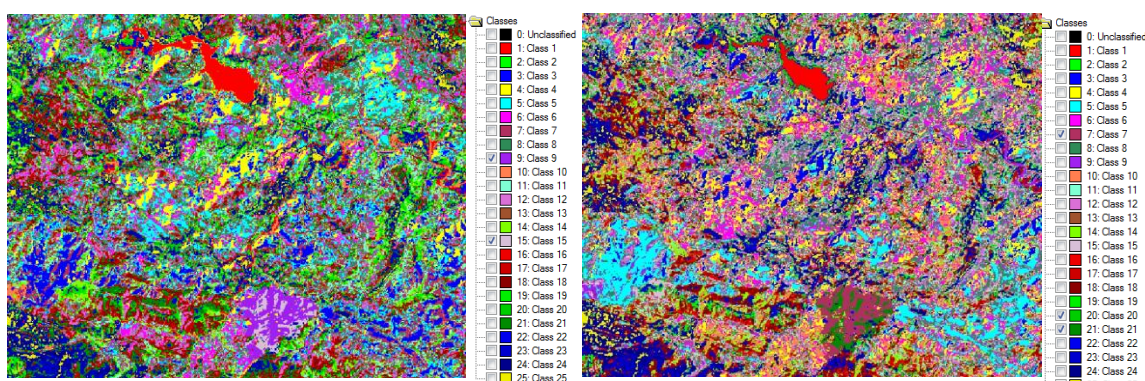


Figura 25: Clasificación no supervisada mediante el algoritmo *k-means* para la imagen multitemporal Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post (derecha) (Incendio 1: situado en Castellón). Número de clases establecidas 25.

Los píxeles con similar comportamiento espectral se han agrupado en varias clases. En los grupos 9 y 15, en el caso de la combinación pre-post incendio y clases 7, 20 y 21 en la otra composición de imágenes.

La Figura 26 muestra el resultado de la clasificación no supervisada, únicamente con las clases que discriminan las zonas quemadas.

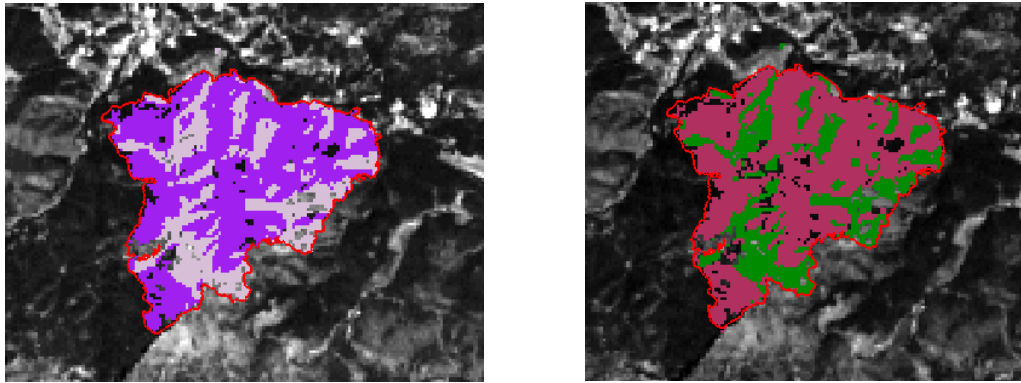


Figura 26: Detalle de la clasificación no supervisada para el incendio situado en Castellón. Combinación pre – post incendio (izquierda) y aniversario – post incendio (derecha).

Las estadísticas derivadas de la matriz de confusión se reflejan en la Tabla 18.

Tabla 17: Estadísticas calculadas para la clasificación no supervisada y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendios situados en Castellón y Cáceres).

	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Incendio Castellón	Incendio Cáceres	Incendio Castellón	Incendio Cáceres
Fiabilidad global (%)	94,14	85,42	93,00	87,15
Estadístico Kappa (k)	0,88	0,99	0,86	0,64
Precisión	0,99	0,50	0,99	0,97
Sensibilidad (TVP)	0,90	0,99	0,50	0,57
Especificidad (TVN)	0,89	0,83	0,87	0,85

Tomando como referencia el incendio situado en Castellón, la combinación multitemporal de imágenes que permite una mejor discriminación del área quemada es la formada por las imágenes pre y post incendio. Por el contrario, en el incendio de Cáceres es la formada por la combinación aniversario-post incendio.

Los resultados derivados de la matriz de confusión muestran en todos los casos estudiados, valores de fiabilidad global elevados (siendo el mayor de todos, obtenido para el incendio de Castellón - 94,14 % -). Así, el número total de píxeles categorizados correctamente respecto al total de verificados es elevado.

La proporción de píxeles discriminados como área quemada frente al total de identificados dentro de la categoría incendio presenta un valor elevado en todos incendios analizados. La única excepción la representa la combinación pre-post (incendio Cáceres) con un valor de 0,50.

La sensibilidad o TVP presenta valores muy elevados (0,90 y 0,99) para la combinación multitemporal pre-post relativa a los dos incendios analizados. Así, la proporción de píxeles identificados como área quemada y que realmente pertenecen a esa categoría es totalmente significativa, al encontrarse los valores próximos a 1. El elevado valor de las Tasa de Verdaderos Positivos reduce considerablemente los errores de omisión producidos.

Del mismo modo, los valores de especificidad comprendidos en el intervalo 0,83 – 0,89 reflejan que apenas se han producido errores de comisión al delimitar las áreas quemadas.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL INCENDIO DE LA RIOJA

Para cartografiar las áreas quemadas del incendio de La Rioja se han aplicado las mismas técnicas (unitemporales y multitemporales) empleadas para los incendios situados en Castellón y Cáceres. El análisis de los resultados de forma cuantitativa no se ha llevado a cabo debido principalmente a la ausencia de información de referencia disponible en *Copernicus*. Se dispone de cartografía del incendio forestal facilitada por la Consejería de Medio Natural del Gobierno de La Rioja. A pesar de disponer del perímetro (delimitado mediante GPS) no se ha empleado por no poseer la misma precisión que la aportada por *Copernicus*. No obstante, al final del estudio, se presenta un apartado sobre posibles perspectivas futuras en las que se recomienda en futuras investigaciones analizar y comparar la discriminación de áreas quemadas empleando imágenes multiespectrales o mediante la delimitación con GPS.

El umbral de reflectancia definido de modo unitemporal para el incendio originado en La Rioja no ha delimitado de forma correcta la zona incendiada, ya que hay una elevada proporción de píxeles realmente quemados que no fueron incluidos en esta categoría. Los métodos basados en el análisis visual (composiciones de distintas fechas y composiciones RGB) discriminan la zona afectada pero en menor medida que en los otros dos incendios.

En lo relativo a la técnica de diferencia de reflectancia, el resultado que minimiza los errores de comisión y omisión es el umbral definido en la banda del infrarrojo medio 2 (IRm2), tanto para la combinación pre-post incendio como para la aniversario-post incendio. En la primera composición se observa como la mayoría de los píxeles catalogados pertenecen a la categoría incendio mientras que en la combinación aniversario-post incendio la proporción de píxeles categorizados como área quemada es elevada pero aparecen píxeles que discriminan otro tipo de cubiertas.

Los índices espectrales NDVI y NBR discriminan de forma satisfactoria la zona quemada para las dos combinaciones multitemporales de imágenes. Por su parte, el NDII (combinación aniversario-post) identifica el área quemada pero a su vez detecta píxeles pertenecientes a otro tipo de cubiertas.

Al igual que para los incendios de Castellón y Cáceres, el método de Componentes Principales permite detectar zonas de cambio entre cubiertas. Por último, la clasificación no supervisada agrupa correctamente píxeles con similar comportamiento espectral, en este caso los identificados como zona quemada. Del mismo modo, existen píxeles realmente quemados que no fueron identificados. Los resultados son similares para las dos combinaciones multitemporales de imágenes.

7 - CONCLUSIONES

- Todas las técnicas de detección de cambios para cartografiar áreas quemadas, han permitido con buenos grados de precisión (Fiabilidad global mayor obtenida 95,58 %) discriminar las zonas incendiadas de las no afectadas por este tipo de fenómenos.
- La técnica de definición de umbrales de reflectancia a partir únicamente de una imagen post-incendio (técnica unitemporal) ha proporcionado resultados satisfactorios en los incendios analizados, excepto en el situado en La Rioja. Para este tipo de método aporta mejores resultados la banda del infrarrojo cercano que las relativas al infrarrojo medio.
- Las técnicas multitemporales que permiten cartografiar las zonas afectadas por los incendios de forma más satisfactoria son por orden: índice espectral NBR, diferencia de reflectancia en la banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2), índice espectral NDVI, Componentes Principales y clasificación no supervisada.
- La imagen diferencia para la banda IRm 2 aporta mayor separabilidad para esta tipología de cambio. Por lo tanto, en el ámbito forestal (en el que se incluyen fenómenos como incendios o talas) el cambio de vegetación a suelo se aprecia significativamente mejor mediante esta banda del espectro.
- Los resultados de los índices espectrales determinan que el más óptimo de los estudiados para discriminar el área afectada por un incendio forestal es el NBR (Fiabilidad global 95,58 %).
- La técnica de Componentes Principales se considera una buena técnica para sintetizar la información de las bandas originales y determinar las posibles zonas de cambio de las cubiertas.
- La clasificación no supervisada identifica con un elevado grado de precisión las zonas quemadas (Fiabilidad global 94,14 %).
- La composición multitemporal formada por las imágenes Pre – Post incendio proporciona en la mayoría de métodos empleados una mejor discriminación de las zonas quemadas, minimizando los errores de comisión y omisión producidos. Por ello, las imágenes con fecha inmediatamente anterior al incendio (pre - incendio) resultan más interesantes para este tipo de estudios que las imágenes aniversario.
- Las imágenes captadas por el sensor Landsat constituyen un buen instrumento para cartografiar áreas quemadas. Este aspecto se debe principalmente a dos motivos, su buena resolución espacial y la libre disposición de ellas, lo que facilita su aplicabilidad en multitud de estudios.

PERSPECTIVAS FUTURAS

En general, la delimitación y cartografía de áreas quemadas mediante teledetección ha sido ampliamente estudiada (De Santis & Chuvieco, 2007; González Alonso *et al.*, 2007; Heredia *et al.*, 2003). En la mayoría de estas investigaciones, el empleo de imágenes Landsat ha proporcionado importantes resultados (Pérez Cabello & De la Riva Fernández, 1998; Martín & Chuvieco, 2001; Epting *et al.*, 2005; Bastarrika *et al.*, 2011; Bastarrika *et al.*, 2014).

Sería recomendable complementar los resultados del presente estudio con los obtenidos utilizando imágenes de libre acceso procedentes de otros satélites. Del mismo modo, la disponibilidad de datos de campo que puedan utilizarse como información de verificación o referencia en el proceso de análisis de los resultados, se considera un aspecto muy importante a tener en cuenta en este tipo de estudios.

MEMORIA

En futuras investigaciones puede tenerse en cuenta, analizar y comparar la discriminación de áreas quemadas empleando imágenes multiespectrales o mediante la delimitación con GPS.

Por último, el uso de nuevos enfoques de estimación de áreas quemadas (como por ejemplo, árboles de decisión) se está convirtiendo en una importante herramienta en la gestión de este tipo de sucesos. Debido a ello, se considera interesante la aplicación de nuevas técnicas que complementen a las ya desarrolladas en el presente estudio.

8 - BIBLIOGRAFÍA

Barsi, J.A., Lee, K., Kvaran, G., Markham, B.L., Pedelty, J.A., 2014. The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. *Remote Sensing* 6: 10232-10251.

Bastarrika Izaguirre, A. & Chuvieco Salinero, E., 2006. Cartografía de área quemada mediante crecimiento de regiones: aplicación en entornos mediterráneos con imágenes TM y ETM+. *Geofocus* 6: 182-204.

Bastarrika, A., Chuvieco, E., Martín, M.P., 2011. Mapping burned áreas from Landsat TM7ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and comisión errors. *Remote Sensing of Environment* 115: 1003-1012.

Bastarrika, A., Alvarado, M., Artano, K., Martínez, M.P., Mesanza, A., Torre, L., Ramo, R., Chuvieco, E., 2014. BAMS: A Tool for Supervised Burned Area Mapping Using Landsat Data. *Remote Sensing* 6: 12360-12380.

Blas Morato, R., González Alonso, F., Gurría Gascón, J.L., 2006. Cartografía de áreas quemadas con SPOT 5. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas: 623-636.

Calle, A.; González-Alonso, F.; Merino De Miguel, S., 2008. Validation of active forest fires detected by MSG-SEVIRI by means of MODIS hot spots and AWIFS images. *International Journal of Remote Sensing* 29: 3407-3415.

Camacho, F., Lacaze, R., Smets, B., Trigo, I., Calvet, J-C., Jann, A., Baret, F., Kidd, R., Defourny, P., Tansey, K., Pacholczyk, P., Balsamo, G., Szintai, B., 2003. La componente global del servicio de superficie terrestre de Copernicus: estado de las operaciones y evolución prevista XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA, Torrejón de Ardoz (Madrid). 22-24 octubre, 2013.

Choung, Y., Lee, B. C., Cho, J. H., Lee, K. S., Jang, I. S., & Kim, S. H., 2004. Forest responses to the large-scale east coast fires in Korea. *Ecological Research* 19: 43-54.

Chowdhury, E., & Hassan, Q., 2015. Development of a New Daily- Scale Forest Fire Danger Forecasting System Using Remote Sensing Data. *Remote Sensing* 7: 2431-2448.

Chuvieco Salinero, E., 2002. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel, S.A. 586 pp. 1ª Edición. Barcelona.

Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M.P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., De la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J.R., Herrera, M.A., Zamora, R., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling* 221: 46-58.

Copernicus. Emergency Management Service. Disponible en: <http://emergency.copernicus.eu>. Varias consultas.

Copin, P.R & Bauer, M.E., 1996. Change Detection in Forest Ecosystems with Remote Sensing Digital Imagery. *Remote Sensing Reviews* 13: 207-234.

De Santis A & Vaughan, P., 2009. Revision de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *Recursos Rurais* 5: 93-100.

De Santis, A & Chuvieco, E., 2007. Burn severity from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment* 108: 422 - 435.

EarthExplorer. Disponible en: <http://earthexplorer.usgs.gov>. Varias consultas.

Epting, J., Verbyla, D., Sorbel., 2005. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment* 96: 328-339.

Gillespie, T., Chu, J., Frankenberg, E., Thomas, D., 2007. Assessment and prediction of natural hazards from satellite imagery. *Progress in Physical Geography* 531: 459-470.

Gómez Nieto, I & Martín Isabel., M.P., 2008. Estudio comparativo de índices espectrales para la cartografía de áreas quemadas con imágenes MODIS. *Revista de Teledetección* 29: 15-24.

González-Alonso, F., Cuevas, J.M., Casanova, J.L., Calle, A., Illera, P., 1997. A forest fire risk assessment using NOAA AVHRR images in the Valencia area, eastern Spain. *International Journal of Remote Sensing* 18: 2201-2207.

González-Alonso, F., Merino De Miguel, S., Roldán-Zamarrón, A., García-Gigorro, S., Cuevas, J. M., 2007. MERIS Full Resolution data for mapping level-of-damage caused by forest fires: the Valencia de Alcántara event in August 2003. *International Journal of Remote Sensing* 28: 797-809.

Heredia Laclaustra, A., Martínez Sánchez, S., Quintero, E., Piñeros, W., Chuvieco, E., 2003. Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+. *Geofocus* 3: 216- 234.

Huesca, M., Gonzalez-Alonso, F., Cuevas, J.M., Merino de Miguel, S., 2008. Estimación de la superficie quemada en los incendios forestales de Canarias en 2007 utilizando sinérgicamente imágenes MODIS y anomalías térmicas. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 17: 308-316.

Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309.

Hunt, E.R & Rock, B.N., 1989. Detection of changes in leaf water content using near and middle infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* 30: 43-54.

Lentile, L.B., Z.A. Holden, A.M.S. Smith, M.J. Falkowski, A.T. Hudak, P. Morgan, S.A. Lewis, P.E. Gessler., N.C. Benson., 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire* 15: 319-345.

Li, R., Kaufman, Y.J., Hao, W.M., Salmon, J.M., Gao, B., 2004. A technique for detecting burn scars using MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42: 1300-1308.

López, M.J & Caselles, V., 1991. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper Data. *Geogarto International* 1: 31-37.

MAGRAMA, 2015. Los incendios forestales en España, 1 enero – 31 diciembre 2015. Avance informativo. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España.

Manzo, L & López, J., 2013. Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* 13:66-83.

Martín Isabel, M.P., Chuvieco Salinero, E., Oliva Pavón, P., Rodríguez-Verdú, F., Nieto Solana, H., Padrón Paredes., 2007. Un ejemplo práctico de aplicación operativa de la teledetección a la gestión de riesgos naturales: Cartografía y evaluación urgente de áreas quemadas en Galicia. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 33: 19-37.

Martín, M.P. & Chuvieco, E., 2001. Propuesta de un nuevo índice para cartografía de áreas quemadas: aplicación a imágenes NOAA-AVHRR y Landsat-TM. *Revista de Teledetección* 16: 57-64.

Martín, M.P., 1988. Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA/AVHRR. Tesis doctoral, Universidad de Alcalá de Henares (Madrid).

Mateu, A & Ruiz, L.A., 1999. Comparación y evaluación de métodos de normalización radiométrica relativa. *Revista de teledetección* 12: 99-103.

MDPI, Open Access Journals Platform. Disponible en: <http://www.mdpi.com>. Visto en julio de 2016.

Miller, H.J & Yool, S.R., 2002. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstorey types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment* 82: 481-496.

Oliva, P & Martín, P., 2007. Mapping burned area by using Spectral Angle Mapper in MERIS images. 6th International workshop on advances in RS and GIS applications in forest fire management. Thessaloniki, Greece. 26-29 de septiembre 2007.

Patterson, M.W & Yool, S.R., 1998. Mapping Fire-Induced Vegetation Mortality Using Landsat Thematic Mapper Data: A Comparison of Linear Transformation Techniques. *Remote Sensing of Environment*, 65: 132-142.

Peay, K.G., Garbelotto, M., Bruns, T.D., 2009. Spore heat resistance plays an important role in disturbance-mediated assemblage shift of ectomycorrhizal fungi colonizing *Pinus muricata* seedlings. *Journal of Ecology* 97: 537-547.

Pereira, J.M.C., Sá, A.C.L., Sousa, A.M.O., Silva, J.M.N., Santos, T.N., Carreiras, J.M.B., 1999. Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. *Remote Sensing of Large Wildfires*: 123-138.

Pérez Cabello & De La Riva Fernández, 1998. El ejemplo de imágenes Landsat TM para la detección y cartografía de áreas incendiadas en el prepirineo occidental oscense. *Geographicalia* 36: 131-145.

Roldán-Zamarrón, A., Merino De Miguel, S., González-Alonso, F., García-Gigorro, S., Cuevas, J.M., 2006. Minas de Riotinto (South Spain) forest fire: burned area assessment and severity mapping using Landsat 5 - TM, Envisat - MERIS and Terra - MODIS post-fire images. *Journal of Gophysical Research* 111, G04S11.

Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.H., Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC. Greenbelt, M.D. USA.

Roy, D.P., Giglio, L., Kendall, J.D., Justice, C.O., 1999. Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. *International Journal of Remote Sensing* 20: 1031-1038.

Roy, P., 2003. Forest fire and degradation assessment using satellite remote sensing and geographic information system. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*: 361-400.

Velez Muñoz, R., 2009. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. Editorial McGraw-Hill. 800 pp. 2ª edición. Madrid.

DOCUMENTO II: ANEXO

DOCUMENTO II: ANEXO**ÍNDICE**

1 - Composiciones RGB multitemporales	1
1.1 - Composiciones de distintas fechas	1
1.2 – Interpretaciones cruzadas	1
2 - Métodos unitemporales	2
2.1 - Reflectancia post – incendio	2
3 - Métodos multitemporales	3
3.1 - Diferencia de reflectancia	3
3.1.1 - Diferencia de reflectancia en el infrarrojo cercano (IRc)	3
3.1.2 - Diferencia de reflectancia en el infrarrojo medio de onda corta (IRm 1)	5
3.1.3 - Diferencia de reflectancia en el infrarrojo medio de onda corta (IRm 2)	6
3. 2. - Diferencia de índices espectrales	7
3.2.1 - Índice espectral NDVI	7
3.2.2 - Índice espectral NDII	8
3.2.3 - Índice espectral NBR	9
3.3 - Componentes Principales (CP)	10
3.4 - Clasificación no supervisada	14

DOCUMENTO II: ANEXO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composición RGB de distintas fechas. Combinación pre - post incendio (izquierda) y aniversario - post incendio (derecha). Incendio 2: situado en Cáceres (superior) e Incendio 3: situado en La Rioja (inferior).	1
Figura 2: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes pre - post incendio. Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 2: situado en Cáceres)....	1
Figura 3: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes aniversario - post incendio. Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 2: situado en Cáceres).	1
Figura 4: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes pre - post incendio. Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 3: situado en La Rioja). ...	2
Figura 5: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes aniversario - post incendio. Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 3: situado en La Rioja).	2
Figura 6: Histograma de reflectancia para la imagen post – incendio y umbral de área quemada (Incendio 2: situado en Cáceres (izquierda) e Incendio 3: situado en La Rioja (derecha).....	2
Figura 7: Imagen post – incendio y umbral de reflectancia definido para la zona (Incendio 2: situado en Cáceres (izquierda) e Incendio 3: situado en La Rioja (derecha).	3
Figura 8: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	3
Figura 9: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	4
Figura 10: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).	4
Figura 11: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRc) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).	4
Figura 12: Histogramas reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	5
Figura 13: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	5
Figura 14: Histogramas reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).....	5
Figura 15: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).....	6

Figura 16: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	6
Figura 17: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	6
Figura 18: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).....	7
Figura 19: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).....	7
Figura 20: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	7
Figura 21: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 2: situado en Cáceres).	8
Figura 22: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).	8
Figura 23: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).	8
Figura 24: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	8
Figura 25: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 2: situado en Cáceres).	9
Figura 26: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).	9
Figura 27: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).	9
Figura 28: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	9
Figura 29: Umbral de refelctancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 2: situado en Cáceres).	10
Figura 30 Histograma de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha (Incendio 3: situado en La Rioja).....	10

INDICE

Figura 31: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).	10
Figura 32: Histograma de reflectancia definido para el ACP y las imagenes multitemporales Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendio 2: situado en Cáceres).	10
Figura 33: ACP aplicado a la combinación multitemporal pre – post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).	11
Figura 34: ACP aplicado a la combinación multitemporal Aniversario – Post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 1: situado en Cáceres).	11
Figura 35: Histograma de reflectancia definido para el ACP y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes multitemporales Pre – Post y Aniversario – Post incendio (Incendio 3: situado en La Rioja).	12
Figura 36: ACP aplicado a la combinación multitemporal Pre – Post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).	13
Figura 37: ACP aplicado a la combinación multitemporal Aniversario – Post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).	13
Figura 38: Clasificación no supervisada mediante el algoritmo <i>k-means</i> para la imagen multitemporal Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres). Número de clases establecidas 25.	14
Figura 39: Detalle de la clasificación no supervisada para el incendio situado en Cáceres. Combinación pre – post incendio (izquierda) y aniversario – post incendio (derecha).	15
Figura 40: Clasificación no supervisada mediante el algoritmo <i>k-means</i> para la imagen multitemporal Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja). Número de clases establecidas 25.	15
Figura 41: Detalle de la clasificación no supervisada para el incendio situado en La Rioja. Combinación pre – post incendio (izquierda) y aniversario – post incendio (derecha). (Incendio 3: situado en La Rioja).	15

DOCUMENTO II: ANEXO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 2: situado en Cáceres).	11
Tabla 2: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 2: situado en Cáceres).	12
Tabla 3: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Aniversario – Post incendio (Incendio 2: situado en Cáceres).	12
Tabla 4: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 3: situado en La Rioja).	13
Tabla 5: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 3: situado en La Rioja).	14
Tabla 6: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Aniversario – Post incendio (Incendio 3: situado en La Rioja).	14

1 - COMPOSICIONES RGB MULTITEMPORALES

1.1 COMPOSICIONES DE DISTINTAS FECHAS

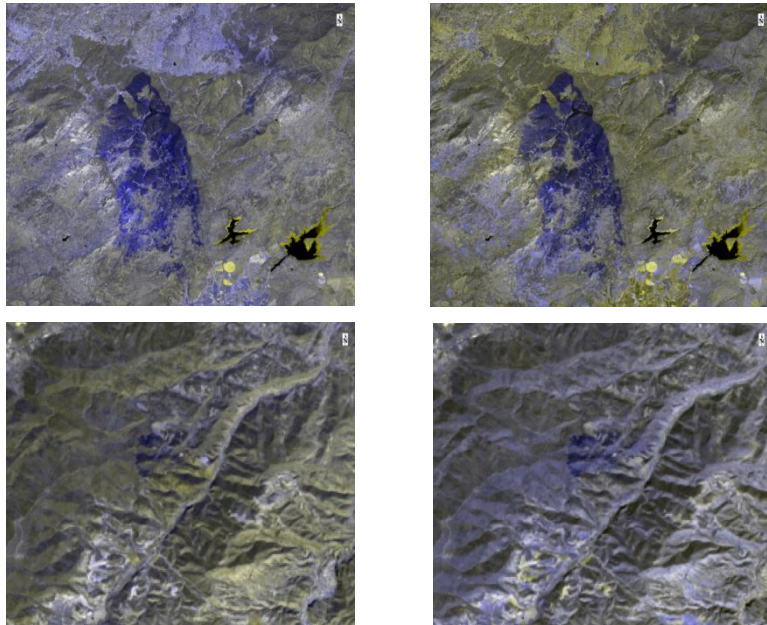


Figura 1: Composición RGB de distintas fechas. Combinación pre - post incendio (izquierda) y aniversario - post incendio (derecha). Incendio 2: situado en Cáceres (superior) e Incendio 3: situado en La Rioja (inferior).

1.2 INTERPRETACIONES CRUZADAS

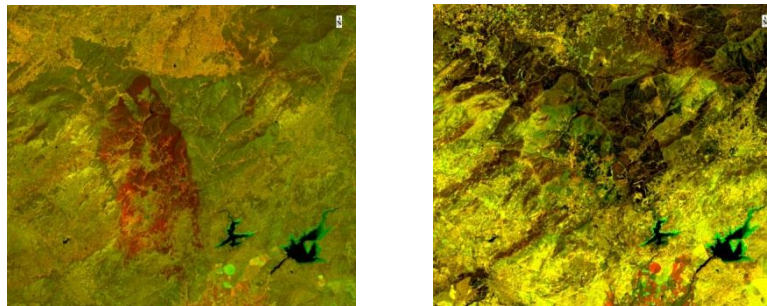


Figura 2: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes pre - post incendio. Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 2: situado en Cáceres).

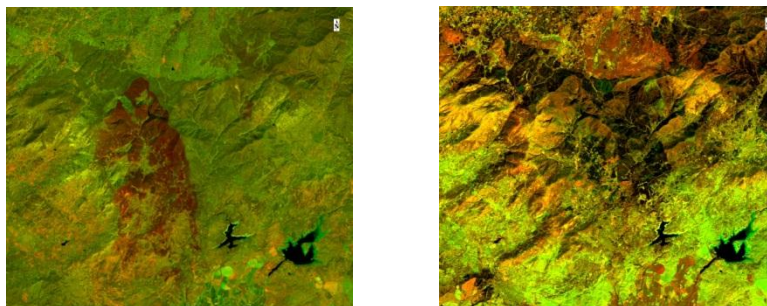


Figura 3: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes aniversario - post incendio. Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 2: situado en Cáceres).

ANEXO

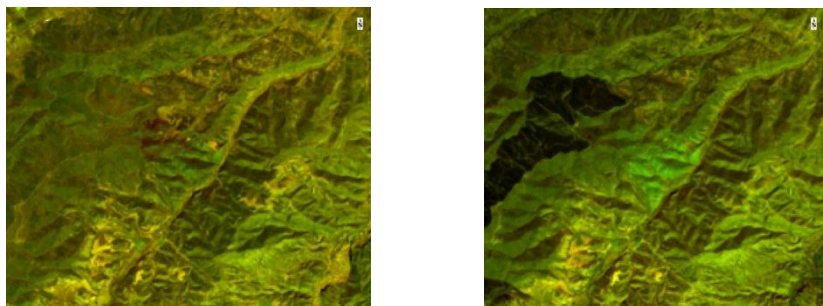


Figura 4: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes pre - post incendio. Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 3: situado en La Rioja).

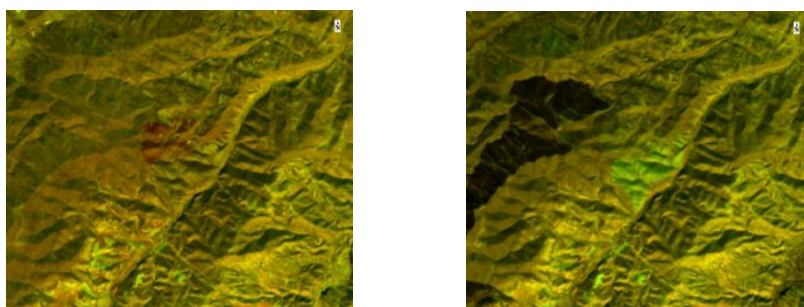


Figura 5: Interpretación cruzada de la combinación de imágenes aniversario - post incendio. Primera y segunda composición en color (imagen izquierda y derecha, respectivamente) (Incendio 3: situado en La Rioja).

2 - MÉTODOS UNITEMORALES

2.1 - REFLECTANCIA POST - INCENDIO

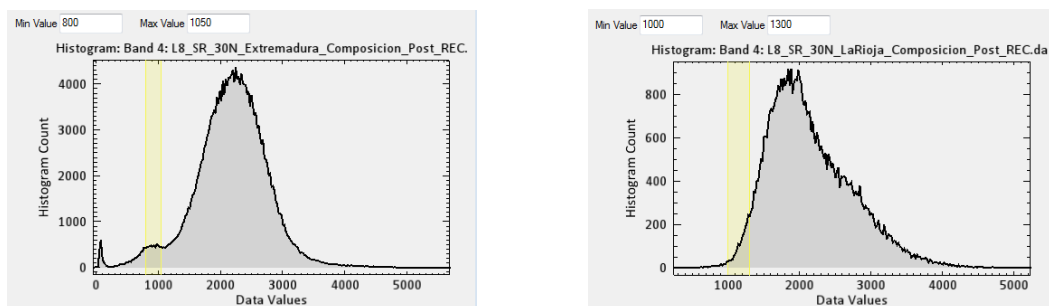


Figura 6: Histograma de reflectancia para la imagen post - incendio y umbral de área quemada (Incendio 2: situado en Cáceres (izquierda) e Incendio 3: situado en La Rioja (derecha)).

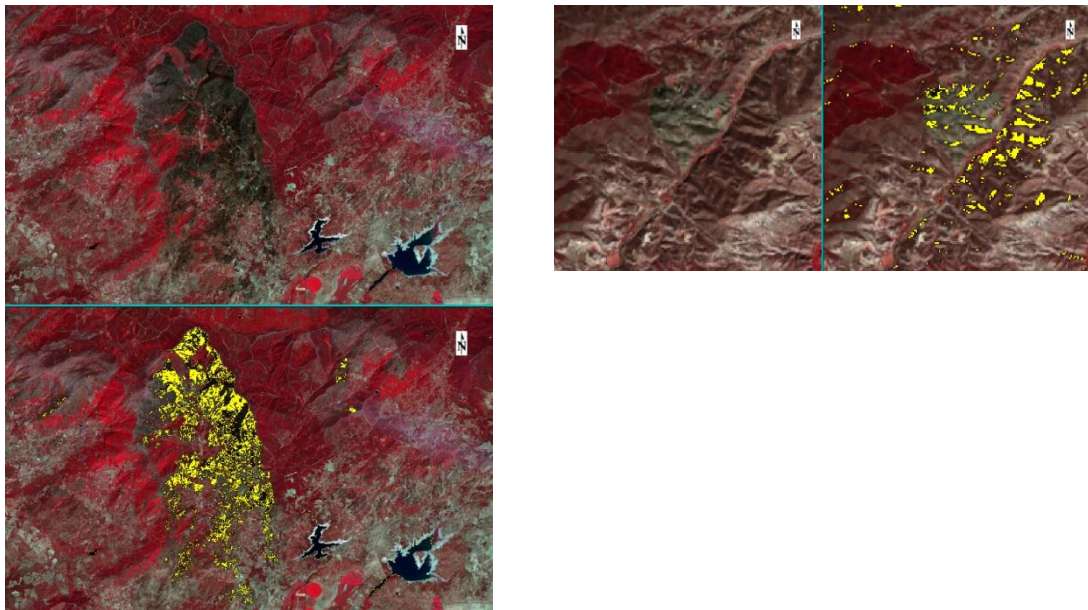


Figura 7: Imagen post – incendio y umbral de reflectancia definido para la zona (Incendio 2: situado en Cáceres (izquierda) e Incendio 3: situado en La Rioja (derecha).

3 - MÉTODOS MULTITEMORALES

3.1. - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA

3.1.1 - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRARROJO CERCANO (IRC)

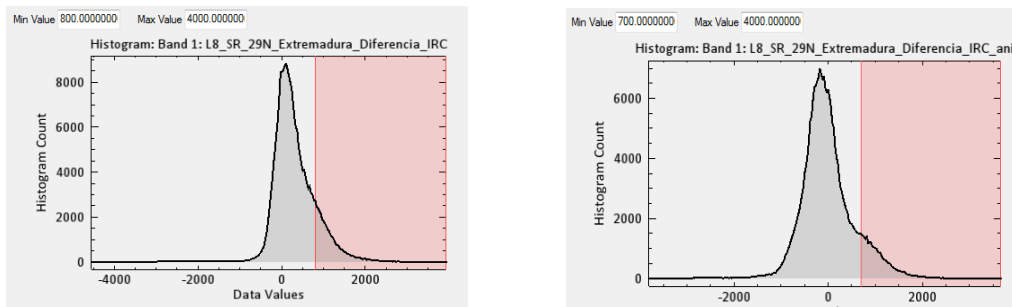


Figura 8: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRC) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

ANEXO

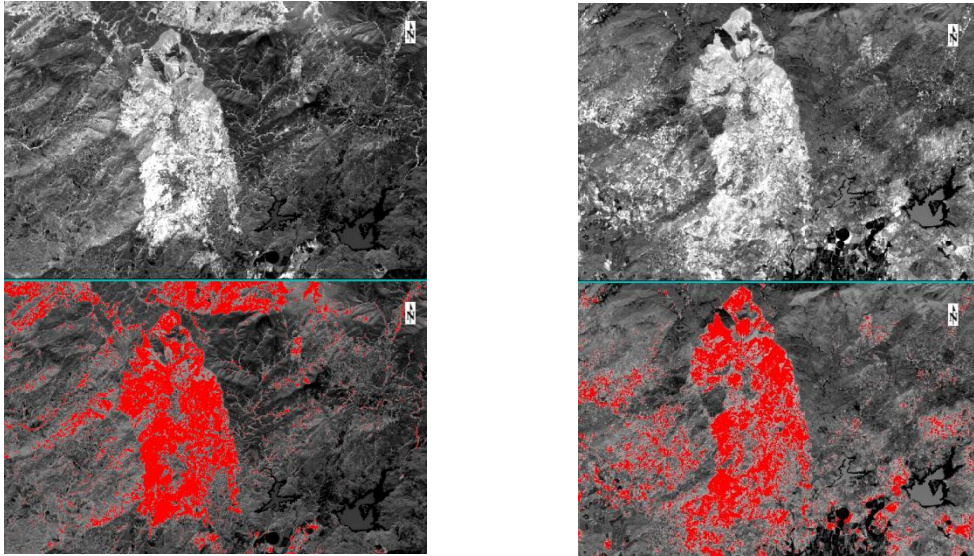


Figura 9: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRC) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

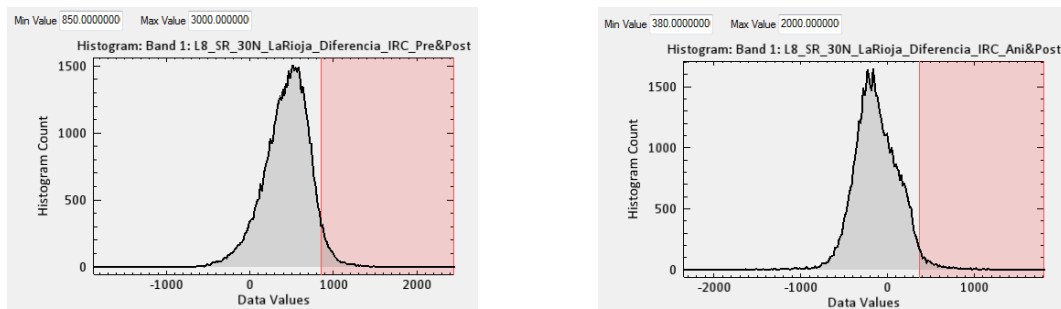


Figura 10: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRC) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).

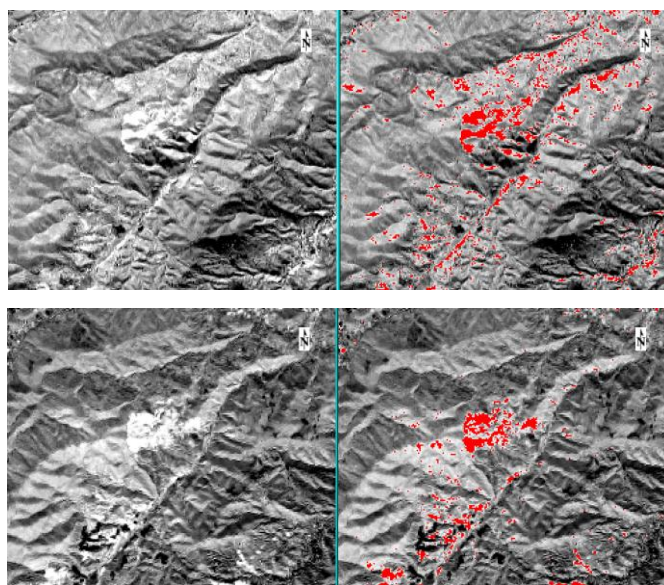


Figura 11: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo cercano (IRC) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).

3.1.2 - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRARROJO MEDIO DE ONDA CORTA (IRm 1)

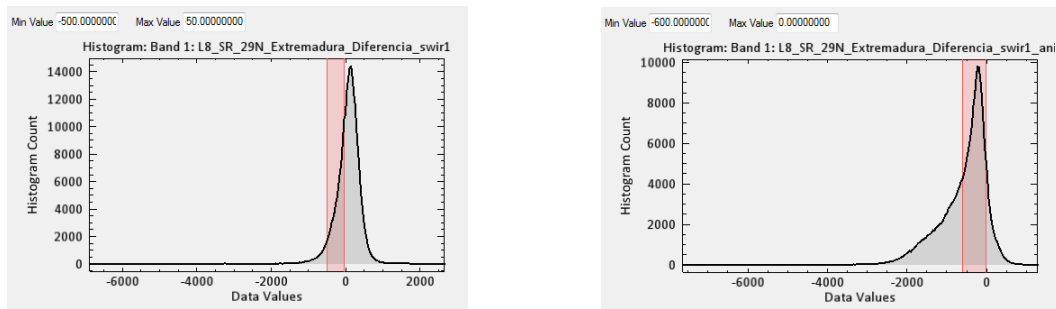


Figura 12: Histogramas reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

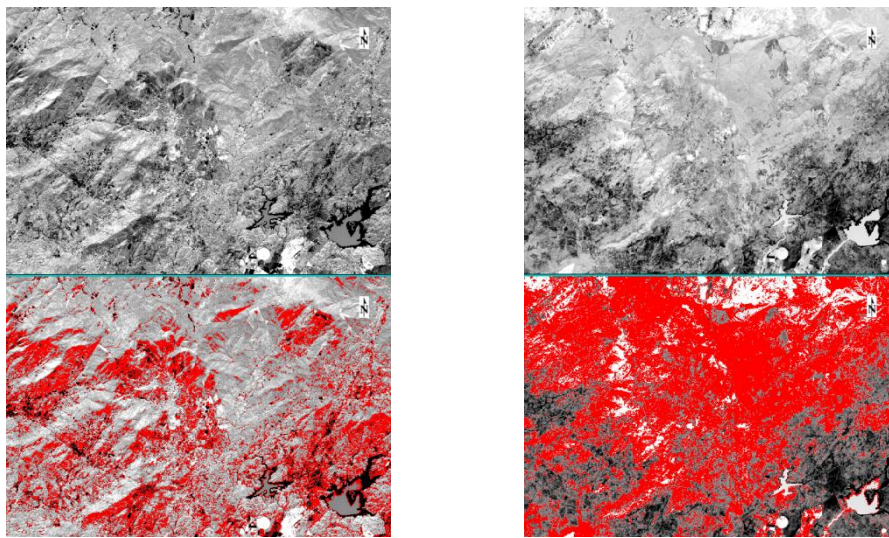


Figura 13: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

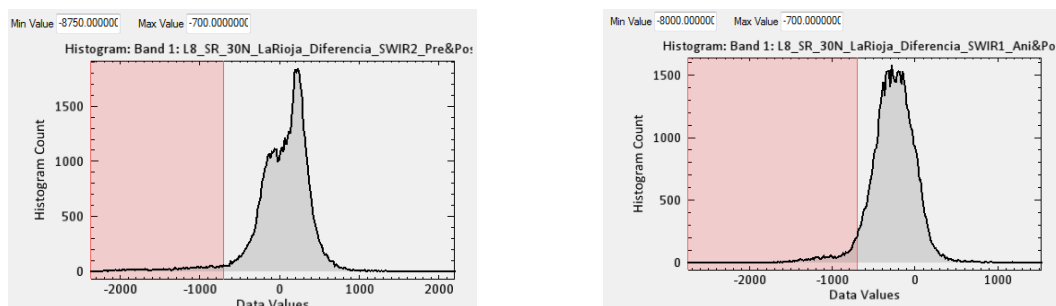


Figura 14: Histogramas reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).

ANEXO

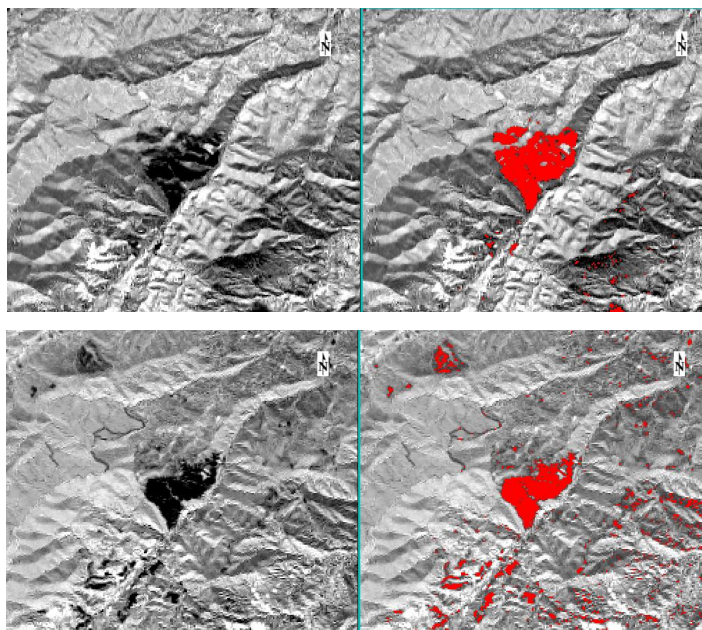


Figura 15: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 1) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).

3.1.3 - DIFERENCIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRARROJO MEDIO DE ONDA CORTA (IRm 2)

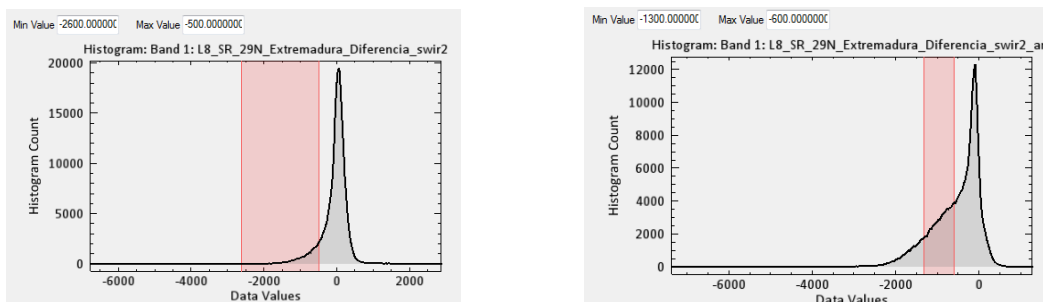


Figura 16: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

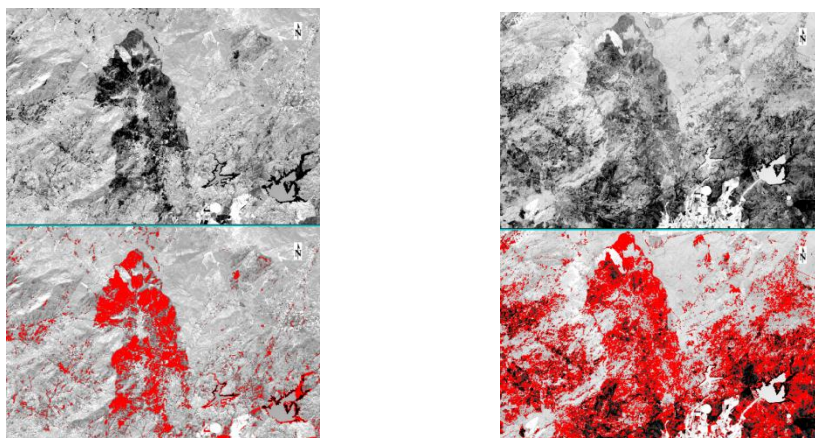


Figura 17: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

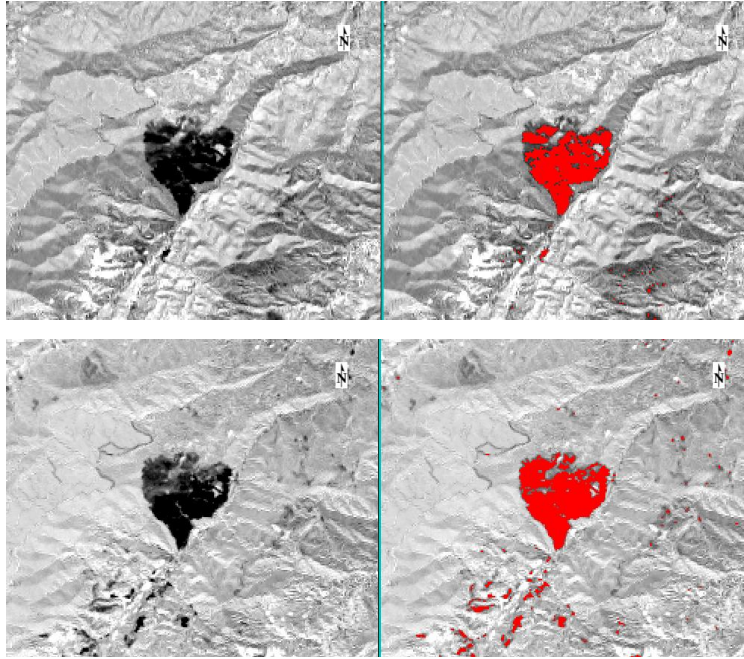


Figura 18: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y las combinaciones de imágenes Pre - Post incendio (superior) y Aniversario - Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).

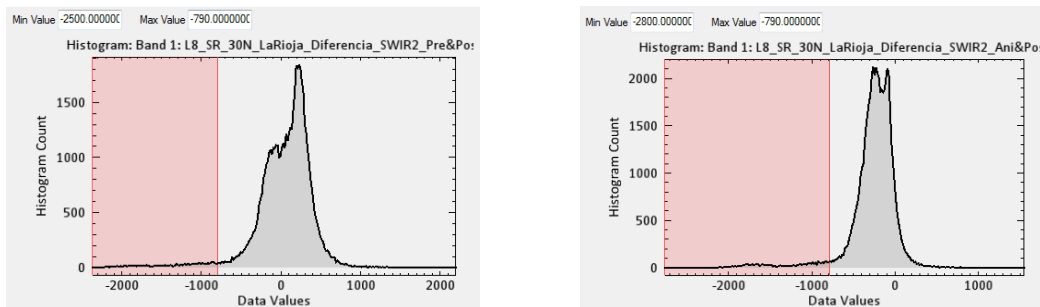


Figura 19: Histogramas de reflectancia para la imagen diferencia de banda del infrarrojo medio de onda corta (IRm 2) y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre - Post incendio (izquierda) y Aniversario - Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).

3.2. - DIFERENCIA DE ÍNDICES ESPECTRALES

3.2.1 - ÍNDICE ESPECTRAL NDVI

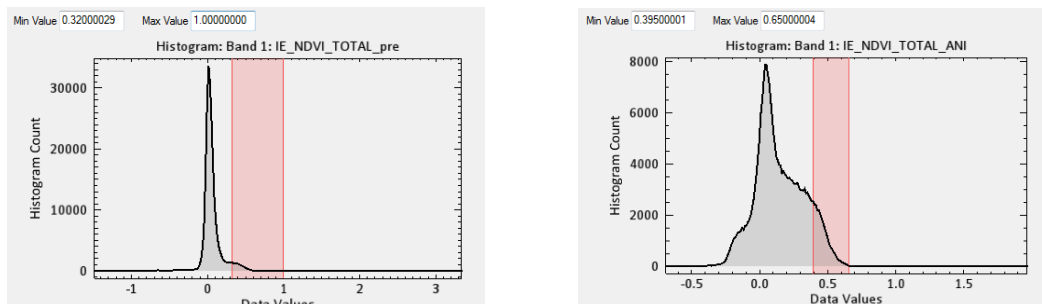


Figura 20: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre - Post incendio (izquierda) y Aniversario - Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

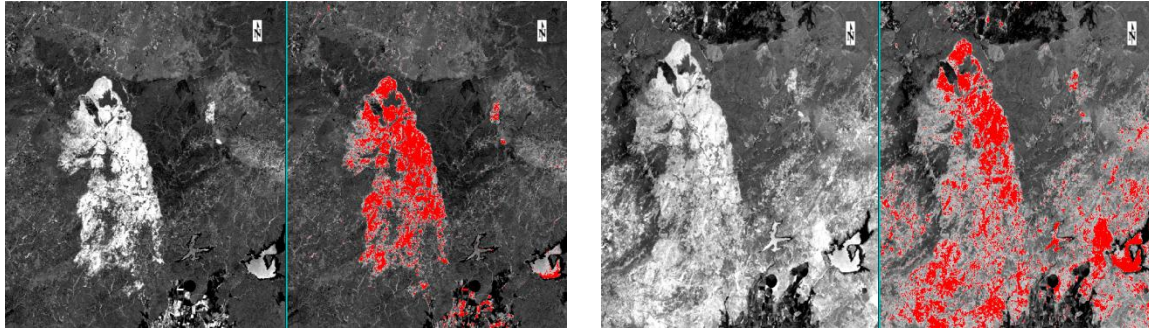


Figura 21: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 2: situado en Cáceres).

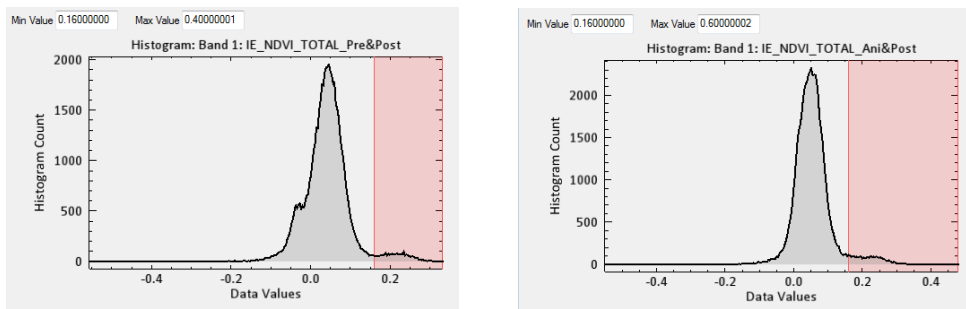


Figura 22: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).

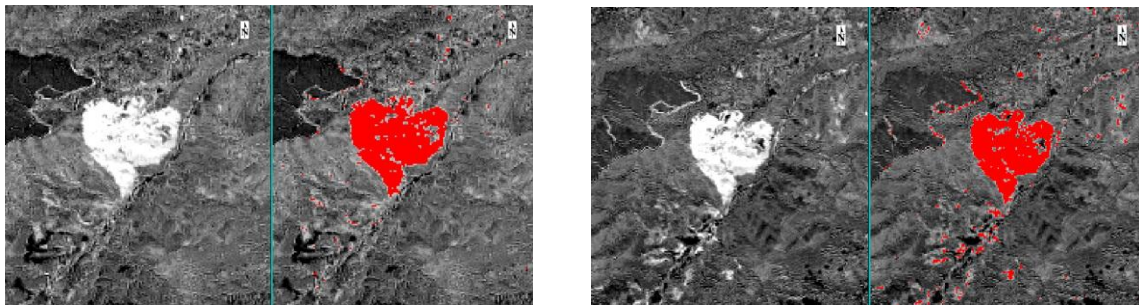


Figura 23: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDVI y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).

3.2.2 - ÍNDICE ESPECTRAL NDII

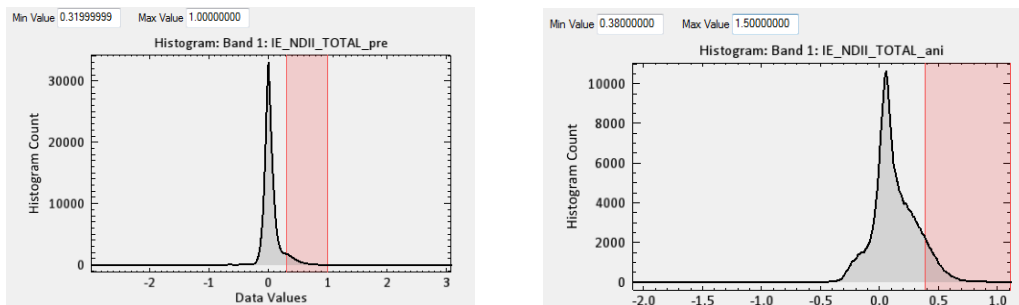


Figura 24: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

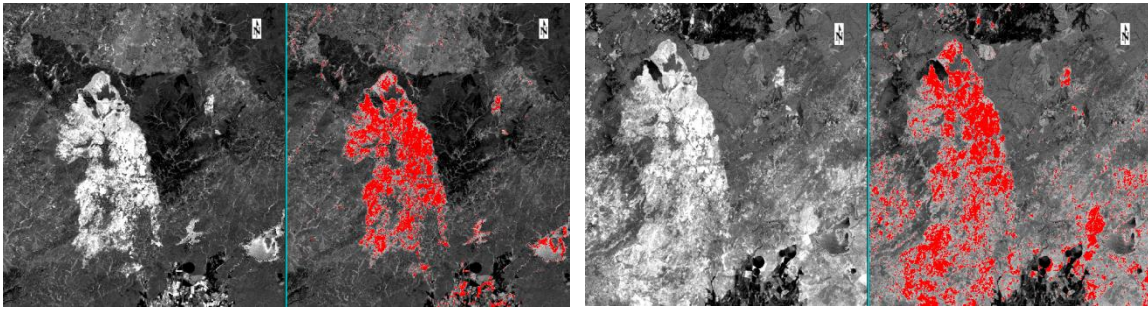


Figura 25: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 2: situado en Cáceres).

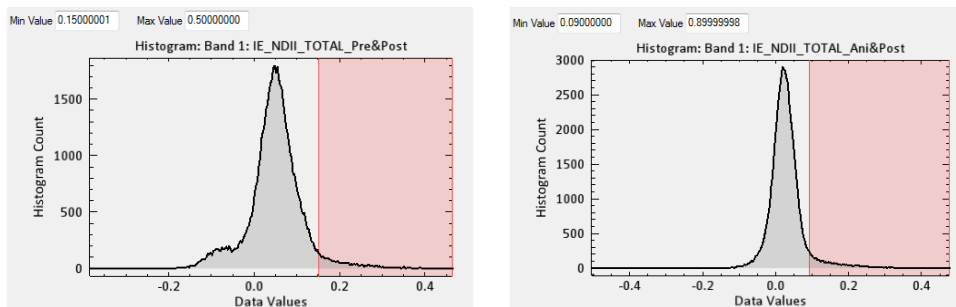


Figura 26: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).

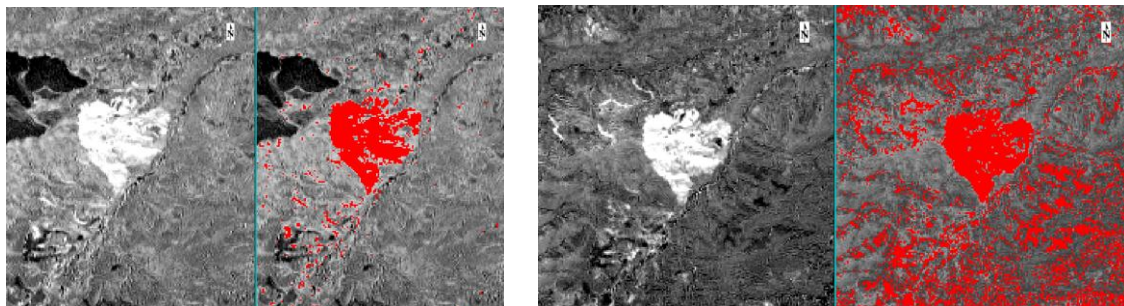


Figura 27: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NDII y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).

3.2.3 - ÍNDICE ESPECTRAL NBR

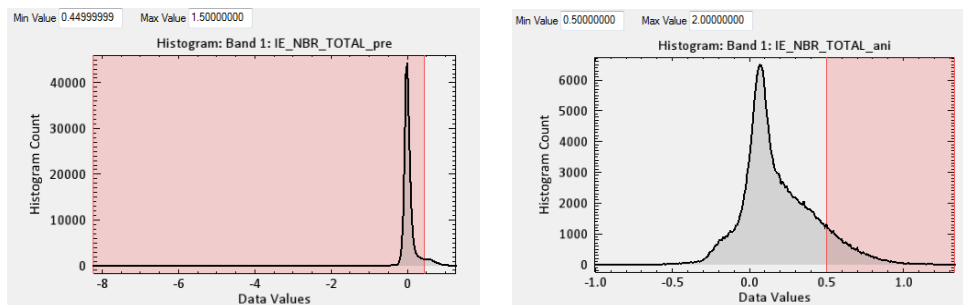


Figura 28: Histogramas de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

ANEXO

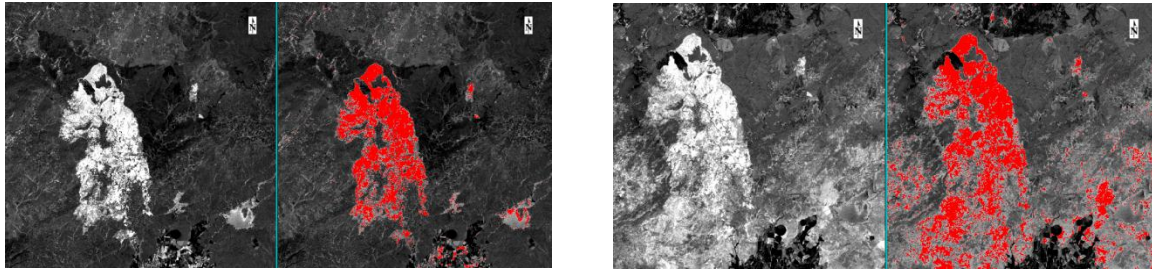


Figura 29: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 2: situado en Cáceres).

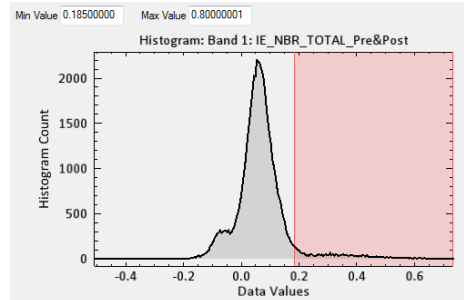


Figura 30 Histograma de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post incendio (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).

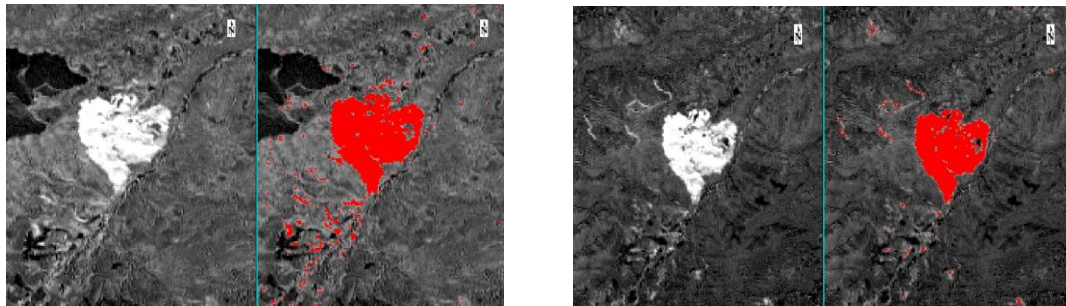


Figura 31: Umbral de reflectancia definido para la imagen diferencia del índice espectral NBR y las combinaciones de imágenes Pre – Post incendio (superior) y Aniversario – Post incendio (inferior) (Incendio 3: situado en La Rioja).

3.3. – COMPONENTES PRINCIPALES (CP)

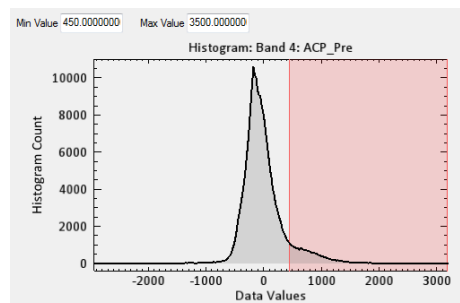


Figura 32: Histograma de reflectancia definido para el ACP y las imágenes multitemporales Pre – Post incendio y Aniversario – Post incendio (Incendio 2: situado en Cáceres).

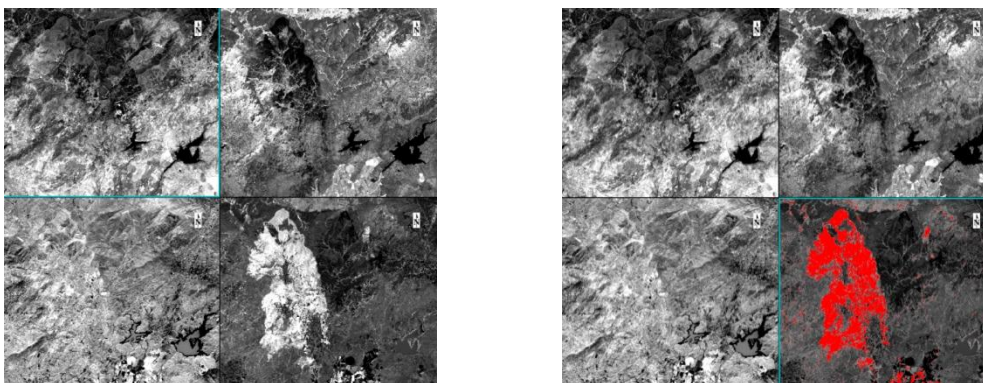


Figura 33: ACP aplicado a la combinación multitemporal pre - post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres).

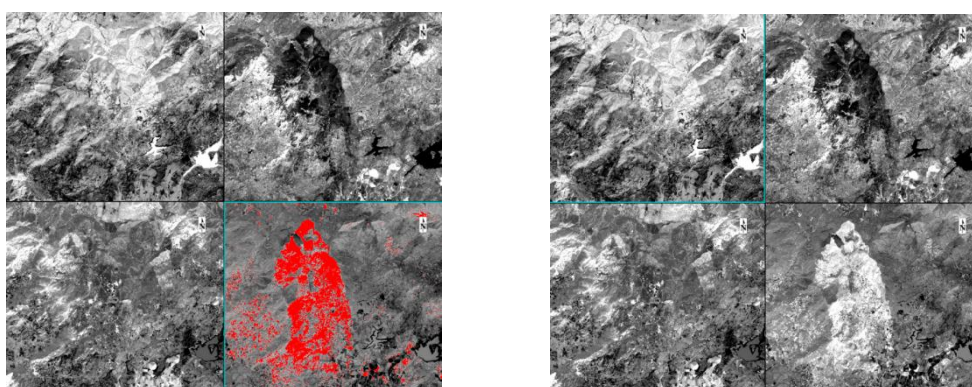


Figura 34: ACP aplicado a la combinación multitemporal Aniversario - Post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 1: situado en Cáceres).

Tabla 1: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre - Post incendio (Incendio 2: situado en Cáceres).

Incendio Cáceres				
	Pre - Post incendio		Ani - Post incendio	
	Eigenvalores	% varianza explicada	Eigenvalores	% varianza explicada
CP1	2788877,09	72,88	2155888,46	71,44
CP2	647670,11	16,93	430556,96	14,27
CP3	178222,06	4,66	211166,21	7,00
CP4	131040,35	3,42	154989,67	5,14
CP5	55321,15	1,45	39177,7	1,30
CP6	12275,1	0,32	13478,98	0,45
CP7	6737,44	0,18	6060,54	0,20
CP8	2841,53	0,07	2834,06	0,09
CP9	2099,78	0,05	1939,63	0,06
CP10	832,02	0,02	901,32	0,03
CP11	433,01	0,01	622,7	0,02
CP12	288,61	0,01	337,66	0,01

ANEXO

Tabla 2: Eigenvectores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 2: situado en Cáceres).

Eigenvectores	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12
Band 1	0.07	0.11	0.20	0.06	0.47	0.39	0.08	0.13	0.21	0.13	0.54	0.43
Band 2	-0.02	0.01	-0.05	0.79	0.06	-0.07	-0.03	-0.02	-0.08	0.56	-0.03	-0.18
Band 3	0.05	0.08	0.14	0.23	0.50	0.39	-0.13	-0.23	-0.27	-0.46	-0.33	-0.25
Band 4	-0.09	-0.13	-0.26	0.47	-0.12	-0.29	-0.04	-0.11	-0.08	-0.56	0.25	0.44
Band 5	-0.17	-0.32	-0.43	-0.28	0.28	-0.02	-0.19	-0.29	-0.45	0.21	0.38	-0.14
Band 6	-0.01	-0.05	-0.09	0.07	0.20	-0.21	0.25	0.25	0.34	-0.29	0.38	-0.66
Band 7	0.23	0.38	0.52	-0.02	-0.18	-0.28	-0.28	-0.24	-0.28	-0.04	0.42	-0.17
Band 8	0.08	0.04	0.13	-0.12	0.57	-0.68	0.18	0.07	-0.09	0.09	-0.27	0.22
Band 9	-0.31	-0.28	0.23	-0.01	0.13	-0.13	-0.58	-0.28	0.57	0.03	-0.07	-0.01
Band 10	0.19	0.47	-0.47	-0.03	0.11	-0.04	-0.59	0.38	0.08	-0.01	-0.05	0.01
Band 11	-0.86	0.31	0.16	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.31	-0.22	-0.03	0.02	-0.00
Band 12	0.15	-0.56	0.30	0.05	-0.03	0.02	-0.29	0.63	-0.29	-0.05	0.02	0.00

Tabla 3: Eigenvectores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Aniversario – Post incendio (Incendio 2: situado en Cáceres).

Eigenvectores	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12
Band 1	-0.03	-0.08	-0.08	-0.29	-0.34	-0.22	-0.09	-0.14	-0.24	-0.18	-0.61	-0.49
Band 2	-0.01	0.00	-0.02	0.60	0.05	-0.08	-0.05	-0.04	-0.13	0.69	-0.15	-0.34
Band 3	0.09	0.07	0.23	-0.26	0.66	0.52	-0.08	-0.12	-0.20	0.04	-0.18	-0.24
Band 4	-0.02	0.01	-0.07	0.65	0.18	0.00	-0.11	-0.22	-0.25	-0.64	-0.11	0.06
Band 5	0.16	0.26	0.35	0.22	-0.10	0.18	0.24	0.37	0.49	-0.12	-0.49	0.01
Band 6	-0.06	-0.01	-0.17	0.05	0.14	-0.05	0.21	0.23	0.27	-0.26	0.41	-0.73
Band 7	-0.36	-0.46	-0.47	-0.02	0.38	-0.05	0.24	0.19	0.17	0.04	-0.36	0.19
Band 8	0.21	0.18	0.25	-0.10	0.44	-0.77	0.16	0.13	-0.14	-0.01	-0.04	0.06
Band 9	0.25	0.10	-0.21	0.01	-0.16	0.21	0.65	0.25	-0.57	0.01	0.03	0.05
Band 10	0.33	0.44	-0.61	-0.05	0.09	0.01	-0.45	0.31	0.04	0.02	-0.09	0.05
Band 11	0.70	-0.27	-0.19	0.01	0.04	-0.02	0.21	-0.50	0.32	0.03	-0.03	-0.01
Band 12	-0.36	0.63	-0.22	-0.06	0.04	-0.03	0.34	-0.51	0.16	0.05	-0.06	0.03

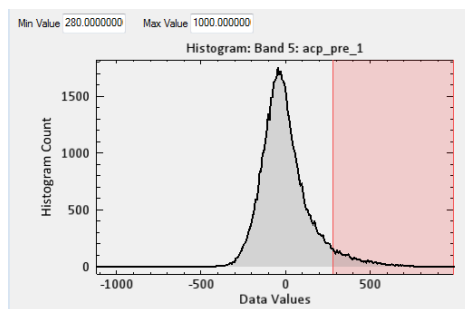


Figura 35: Histograma de reflectancia definido para el ACP y umbral de área quemada. Combinaciones de imágenes multitemporales Pre – Post y Aniversario – Post incendio (Incendio 3: situado en La Rioja).

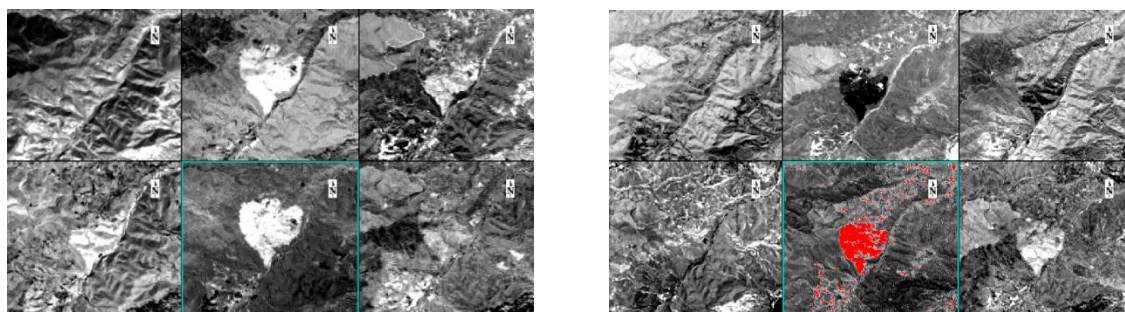


Figura 36: ACP aplicado a la combinación multitemporal Pre – Post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).

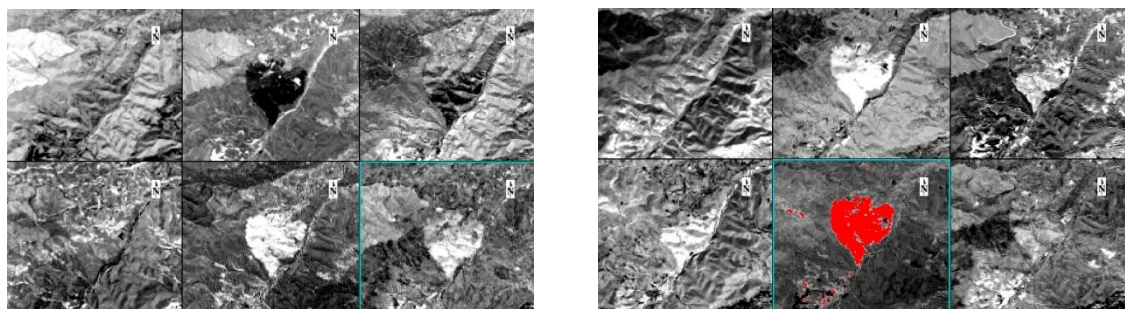


Figura 37: ACP aplicado a la combinación multitemporal Aniversario – Post incendio (izquierda) y umbral de reflectancia estimado (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja).

Tabla 4: Eigenvalores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 3: situado en La Rioja).

Incendio La Rioja				
	Pre – Post incendio		Ani – Post incendio	
	Eigenvalores	% varianza explicada	Eigenvalores	% varianza explicada
CP 1	3385374,44	89,71	4310670,55	92,00
CP 2	176601,10	4,68	181805,89	3,88
CP 3	123128,70	3,26	91867,95	1,96
CP 4	47950,22	1,27	63750,7	1,36
CP 5	22469,50	0,60	20492,92	0,44
CP 6	9138,09	0,24	7640,61	0,16
CP 7	4911,65	0,13	5003,04	0,11
CP 8	1719,92	0,05	1572,02	0,03
CP 9	1097,34	0,03	1398,27	0,03
CP 10	742,70	0,02	731,69	0,02
CP 11	454,93	0,01	509,57	0,01
CP 12	175,07	0,00	303,32	0,01

ANEXO

Tabla 5: Eigenvectores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Pre – Post incendio (Incendio 3: situado en La Rioja).

Eigenvectores	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12
Band 1	-0.11	-0.17	-0.23	-0.20	-0.38	-0.33	-0.12	-0.21	-0.27	-0.28	-0.48	-0.41
Band 2	0.10	0.18	0.21	0.56	0.02	0.06	0.02	0.07	0.02	0.48	-0.41	-0.44
Band 3	0.12	0.19	0.27	-0.15	0.46	0.48	-0.05	-0.10	-0.10	-0.52	-0.28	-0.21
Band 4	0.16	0.24	0.36	-0.34	-0.36	-0.14	0.24	0.39	0.51	-0.12	-0.22	-0.00
Band 5	0.04	0.08	0.12	0.64	-0.21	-0.15	-0.02	-0.10	0.01	-0.49	-0.16	0.48
Band 6	-0.03	-0.09	-0.05	-0.22	-0.23	0.48	-0.06	-0.10	-0.11	0.34	-0.50	0.52
Band 7	-0.23	-0.35	-0.50	0.14	0.33	0.06	0.14	0.31	0.46	-0.13	-0.30	-0.01
Band 8	-0.21	-0.32	0.15	0.15	-0.45	0.49	-0.29	-0.08	0.31	-0.12	0.28	-0.28
Band 9	0.33	0.10	-0.38	0.12	-0.30	0.35	0.37	0.42	-0.38	-0.15	0.15	-0.12
Band 10	0.44	-0.30	-0.02	0.01	-0.01	0.03	0.55	-0.60	0.23	0.03	0.02	-0.06
Band 11	-0.56	0.60	-0.24	0.01	-0.11	0.13	0.34	-0.32	0.13	-0.01	0.05	-0.06
Band 12	-0.48	-0.38	0.46	0.02	0.03	-0.02	0.52	0.17	-0.34	-0.02	-0.01	0.01

Tabla 6: Eigenvectores estimados a partir del ACP de la imagen multitemporal Aniversario – Post incendio (Incendio 3: situado en La Rioja).

Eigenvectores	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12
Band 1	0.09	0.18	0.23	0.29	0.46	0.36	0.11	0.18	0.24	0.25	0.43	0.36
Band 2	-0.09	-0.16	-0.16	-0.58	-0.00	0.01	0.01	-0.01	0.06	-0.47	0.40	0.47
Band 3	-0.01	-0.03	-0.04	-0.09	-0.54	-0.33	0.16	0.31	0.39	0.50	0.09	0.23
Band 4	-0.24	-0.37	-0.51	0.33	0.09	-0.14	-0.16	-0.24	-0.33	0.31	0.28	0.18
Band 5	0.07	0.11	0.11	0.59	-0.26	-0.23	0.01	-0.08	0.00	-0.46	-0.19	0.51
Band 6	0.06	0.03	0.07	-0.21	-0.25	0.55	-0.11	-0.21	-0.28	0.31	-0.39	0.44
Band 7	0.35	0.39	0.31	-0.15	-0.08	-0.38	-0.09	-0.27	-0.45	0.17	0.38	0.02
Band 8	0.31	0.24	-0.47	-0.13	0.39	-0.23	0.31	0.31	-0.21	0.06	-0.35	0.22
Band 9	0.44	-0.07	-0.27	0.18	-0.42	0.40	0.17	0.31	-0.25	-0.18	0.32	-0.22
Band 10	-0.50	0.42	-0.02	0.01	-0.08	0.03	-0.41	0.55	-0.29	-0.05	0.05	0.02
Band 11	0.45	-0.44	0.16	-0.03	0.14	-0.13	-0.65	0.33	0.03	0.02	-0.10	0.09
Band 12	-0.22	-0.46	0.47	-0.01	0.06	-0.09	0.46	0.30	-0.46	0.01	-0.04	0.06

3.4 - CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

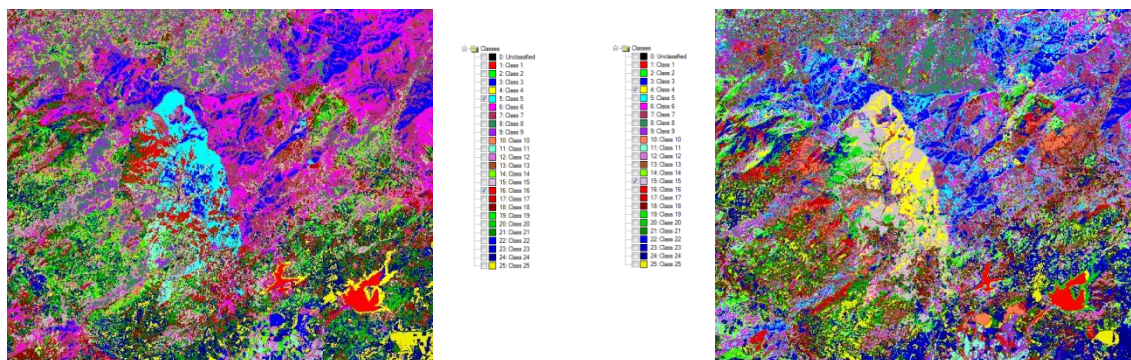


Figura 38: Clasificación no supervisada mediante el algoritmo *k-means* para la imagen multitemporal Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post (derecha) (Incendio 2: situado en Cáceres). Número de clases establecidas 25.

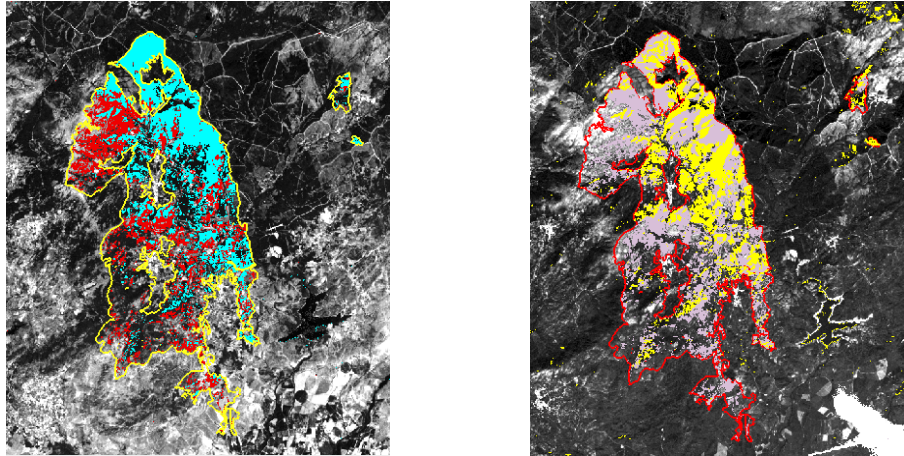


Figura 39: Detalle de la clasificación no supervisada para el incendio situado en Cáceres. Combinación pre – post incendio (izquierda) y aniversario – post incendio (derecha).

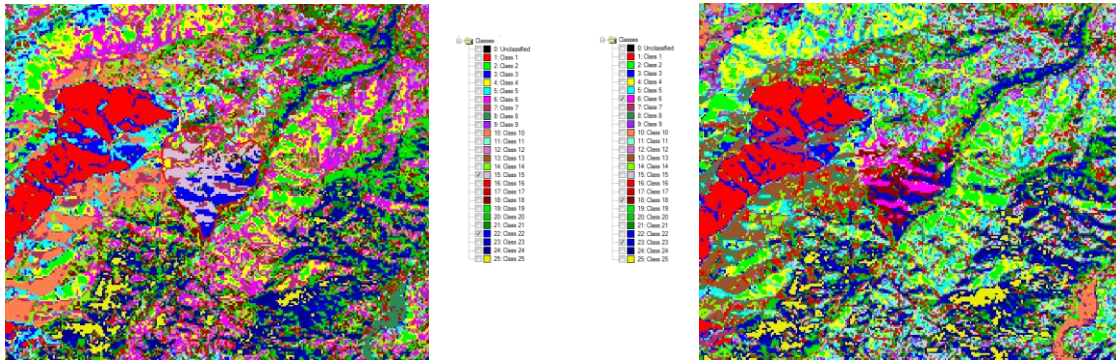


Figura 40: Clasificación no supervisada mediante el algoritmo *k-means* para la imagen multitemporal Pre – Post incendio (izquierda) y Aniversario – Post (derecha) (Incendio 3: situado en La Rioja). Número de clases establecidas 25.

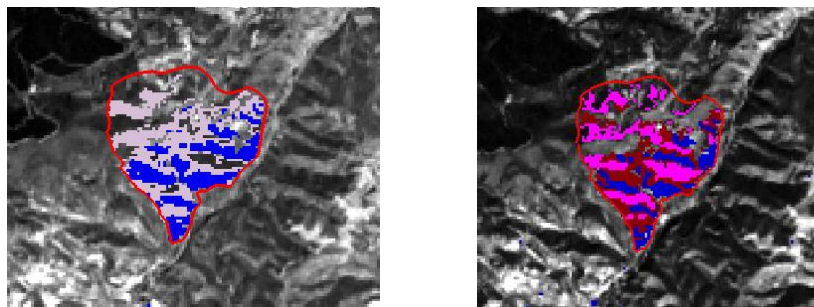


Figura 41: Detalle de la clasificación no supervisada para el incendio situado en La Rioja. Combinación pre – post incendio (izquierda) y aniversario – post incendio (derecha). (Incendio 3: situado en La Rioja).

