

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

ESTUDIO DE CASOS PARA DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE FENÓMENOS NATURALES CON IMÁGENES DE SEVIRI, MODIS Y LANDSAT TM 5: EMISIONES VOLCÁNICAS, CICLOGÉNESIS EXPLOSIVAS Y GRANDES INCENDIOS FORESTALES

ANA NIETO MASOT¹; CELESTE GARCÍA PAREDES² y ALBERTO FERNÁNDEZ SÁNCHEZ³

Departamento de A. y Ciencias del Territorio. Universidad de Extremadura
Campus Universitario, s/n, 10070, Cáceres, España.

¹ ananieto@unex.es, ² celeste@unex.es, ³ afernandez@unex.es

RESUMEN

En este artículo hemos analizado la posibilidad que nos brindan las imágenes obtenidas a través del sistema *Eumetcast*, pertenecientes al sensor SEVIRI del satélite geostacionario *Meteosat-9*, para discriminar en tiempo real diferentes fenómenos naturales, tales como partículas en suspensión procedentes de emisiones volcánicas, inestabilidad atmosférica adversa y grandes incendios forestales. A la citada capacidad del sensor SEVIRI se ha añadido la mejora en la resolución espacial que proporciona el sensor MODIS de los satélites *Terra* y *Aqua* (500 metros) y las imágenes del satélite *Landsat TM 5* (30 m) para localizar y analizar el impacto de los incendios forestales que sufrió la *Raya hispano-lusa* el verano del 2003 y la comarca de Las Hurdes (Cáceres) en 2009.

Palabras clave: fenómenos naturales, teledetección, SIG, incendios forestales, ciclogénesis explosiva, emisiones volcánicas.

DETECTION AND ANALYSIS OF NATURAL PHENOMENA BASED ON SEVIRI, MODIS AND LANDSAT TM 5 IMAGES: VOLCANIC EMISSIONS, EXPLOSIVE CYCLOGENESIS AND GREAT FOREST FIRES CASE STUDIES

ABSTRACT

In this paper it has been analyzed the possibilities provided by the images obtained through the *Eumetcast* system with SEVIRI sensor, belonging to the geostationary satellite *Meteosat-9*, to discriminate various real time natural phenomena such as airborne particles from volcanic emissions, atmospheric instability and great forest fires. Jointly the SEVIRI sensor capability, it has been added the improved spatial resolution provided by the MODIS sensor on Terra and Aqua satellites (500 m) and *Landsat TM 5* satellite images (30 m) to locate and

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

analyze the impact of forest fires affecting the Spanish-Portuguese Raya in the summer 2003 and Las Hurdes (Cáceres) zone in 2009.

Keywords: Natural phenomena, remote sensing, GIS, wildfires, explosive cyclogenesis, volcanic emissions.

1. Introducción

La creciente importancia en la sociedad por el conocimiento de los sucesos y las consecuencias de los fenómenos naturales adversos se explica por el aumento del interés general en materia medioambiental, fruto del amplio debate suscitado en torno al cambio global favorecido por una mayor difusión de la información a través de diversos canales de distribución a nivel mundial.

Las imágenes obtenidas a través de sensores instalados en plataformas satelitales proporcionan una valiosa fuente de información para llevar a cabo actuaciones en materia de prevención, alerta, mitigación de desastres y recuperación de las zonas afectadas por fenómenos naturales (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002).

La Teledetección se ha convertido en una herramienta imprescindible para el análisis y la evaluación de los riesgos naturales (Chuvienco y Cocero, 2004) gracias a la disponibilidad de imágenes a nivel global, casi en tiempo real, que ayudan a alertar de las posibles consecuencias derivadas de un determinado fenómeno natural. Tomemos como referencia el caso de la erupción del volcán islandés Eyjafjallajokull, que durante el mes de abril de 2010 alteró el tráfico aéreo de gran parte del norte y centro de Europa y obligó a cancelar vuelos en buena parte del mundo.

La erupción del volcán Eyjafjallajokull generó nubes con un alto contenido de ceniza y dióxido de azufre (SO₂). La duración de la ceniza volcánica en la atmósfera es corta, horas o como mucho días, por lo que no juega un papel negativo en el medioambiente (Prata y Kerkmann, 2007). Sin embargo, el estudio del dióxido de azufre es muy importante para los científicos del clima ya que es un gas irritante y tóxico que en la atmósfera se transforma en ácido sulfúrico (H₂SO₄) y se convierte en el principal causante de la lluvia ácida. Para detectar la presencia o ausencia del dióxido de azufre es común utilizar el canal de vapor de agua 7.3 y el canal infrarrojo 8.6, porque en estas dos regiones el SO₂ es fuertemente absorbido (Watson *et al.*, 2004; Marchese *et al.*, 2010).

Por otro lado, las erupciones volcánicas llegan a expulsar grandes cantidades de ceniza volcánica a la atmósfera que pueden alcanzar hasta alturas de un máximo de 50 km en las explosiones más energéticas (Carn *et al.*, 2007). La presencia de ceniza volcánica y distintas partículas en las nubes se convierten en un peligro potencial para el tráfico aéreo (Tupper *et al.*, 2006), tal es así que durante el mes de abril con las erupciones del volcán islandés se anularon numerosos vuelos en el espacio aéreo europeo. Las cenizas volcánicas finas son las más peligrosas para el tráfico aéreo, puesto que muestran un largo periodo de permanencia en la atmósfera y se pueden encontrar a grandes distancias (Tupper *et al.*, 2009).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

En este trabajo analizaremos distintas metodologías, a través del análisis de imágenes del sensor SEVIRI, para detectar erupciones volcánicas y emisiones de dióxido de azufre en tiempo real en el estudio de la erupción del volcán Eyjafjallajökull.

El siguiente planteamiento que se aborda en este artículo es el conocimiento en tiempo real de fenómenos de inestabilidad atmosférica. No podemos olvidar las cuantiosas consecuencias provocadas por las fuertes borrascas registradas sobre el continente europeo durante el invierno del año 2010. Otra vez más, la contribución de la Teledetección supuso una mejora sustancial a la hora de prevenir a la población de la inminente llegada de esta "ciclogénesis explosiva", contribuyendo a salvaguardar la integridad de bienes materiales y pérdidas humanas. En este caso se utilizarán también imágenes del sensor SEVIRI para observar, en tiempo real, el dinamismo de perturbaciones atmosféricas severas.

Por último, realizaremos un estudio de casos para detección y evaluación de incendios forestales, por ser uno de los grandes problemas medioambientales que causan al año numerosos daños en los bosques de todo el mundo. Solamente en España la superficie quemada anual se sitúa en torno a 150.000 ha (según fuentes del Instituto Nacional de Estadística). Suponen un grave problema, no solo para el medioambiente sino para la población, quien en ocasiones se ve afectada directamente por los efectos del fuego, llegando incluso a causar pérdidas humanas.

Los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección constituyen herramientas de gran utilidad para la gestión de los bosques y demás recursos naturales. La Teledetección ofrece la posibilidad de obtener información de la situación antes, durante y después de un incendio forestal, lo que favorece la actuación inmediata, contribuyendo así a minimizar los daños (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002 y Chuvieco y Martínez, 2003).

Para optimizar los esfuerzos de extinción de los grandes incendios forestales una de las claves es la llegada de los medios adecuados para su control al lugar del evento lo más pronto posible. Para ello, la Teledetección ha propiciado la creación de *Sistemas de Alerta Temprana* para avisar de la aparición y evolución de incendios forestales (Olcina y Ayala, 2007). Esto es posible a través de la capacidad que tienen los nuevos sensores de capturar la temperatura emitida por la superficie terrestre (Eidenshenk *et al.*, 1990). Los *Sistemas de Alerta Temprana* están jugando un papel crucial en la gestión de incendios forestales, movilizandolos medios necesarios en un corto periodo de tiempo. Además de acudir pronto al lugar donde se está produciendo un incendio forestal, es de vital importancia el seguimiento del mismo. Es en este aspecto donde la Teledetección, de nuevo, se convierte en una herramienta imprescindible a la hora de mostrar casi en tiempo real la evolución que está siguiendo un determinado incendio. El límite en la precisión de estos datos viene dado por las distintas capacidades que poseen los sensores a bordo de las diversas plataformas satelitales.

Se presentarán escenarios en tiempo real de incendios y evaluación de situaciones post-incendio. El escenario post-incendio es uno de los elementos a tener muy en cuenta a la hora de cuantificar las pérdidas de masa forestal que ha ocasionado el fuego, puesto que la Teledetección permite una observación sistemática de toda la superficie terrestre, abarcando un rango del espectro sensible a la discriminación de la señal quemada (Chuvieco, 1999; Chuvieco, 2008; Ruíz-Gallardo *et al.*, 2003). Otra utilidad que brinda la imagen de satélite es facilitar la

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

labor para las tareas de recuperación de la vegetación y seguimiento de dicho proceso. En esta línea existen trabajos que han evaluado el efecto de la severidad del incendio en la respuesta de la vegetación al fuego para su regeneración, monitoreando la variación del NDVI a través del tiempo (Díaz Delgado *et al.*, 2003). Los incendios forestales de carácter catastrófico producen importantes cambios en el ecosistema, producto de la eliminación de la cubierta vegetal y la alteración de las propiedades edáficas del suelo, aumentando el riesgo de erosión y, por lo tanto, el tiempo necesario para recuperar dicho ecosistema (Miller y Yool, 2002). Hasta el momento, la Teledetección es una herramienta que permite calcular de una manera sencilla el perímetro de superficie forestal que ha sido arrasado por las llamas. Para esta tarea es necesaria la utilización de sensores que posean una alta resolución espacial que facilite dicha cuantificación.

Como hemos comentado, la resolución espacial resulta de gran importancia a la hora de mostrar con un menor grado de error la dirección que sigue la columna de fuego (así como el área ya quemada), pero sin olvidar nunca la necesidad que existe de estar informado en tiempo real de esta evolución, para lo cual se requieren sensores capacitados para ofrecer una resolución temporal lo más alta posible (Padilla y Chuvieco, 2009). Teniendo en cuenta estos dos parámetros para los distintos sensores capaces de detectar la temperatura emitida y reflejada dentro del espectro electromagnético, destacamos las posibilidades que ofrece el sensor SEVIRI en cuanto a su resolución temporal de 15 minutos, que nos provee de una valiosa información, útil para la detección y seguimiento de los grandes incendios forestales en tiempo real. Sin embargo, su resolución espacial es insuficiente en el estudio de algunos de estos desastres medioambientales, puesto que 3 km o incluso 1 km de resolución resultan inapropiados por su escasa precisión, necesitando de un incendio de al menos 1,5 ha para detectar un incendio con temperaturas de 600 K°, sin incluir los efectos de atenuación provocados por la atmósfera (Casanova *et al.*, 2004).

Las imágenes de SEVIRI se completarán con la utilización de otro tipo de sensores: MODIS y *Landsat TM 5*, que se emplearán en el estudio post-incendio por su mayor resolución espacial y espectral. MODIS es el sensor que posee la mejor resolución espectral de entre los satélites utilizados por el equipo de investigación en este trabajo. Además de su empleo en la labor de seguimiento diario del incendio, posee características que nos ayudan a discriminar, con un mayor grado de acierto, variables como son las temperaturas irradiadas, gases emitidos, extensión de la superficie quemada, etc. Otra de las grandes ventajas que muestra el empleo de imágenes MODIS es el acceso que hay tanto para las imágenes originales como para los productos derivados en Internet, así como los algoritmos utilizados para llevar a cabo las distintas correcciones que poseen las imágenes (Chuvieco, 2008).

Landsat TM 5 servirá para mejorar la resolución espacial (de 30 m para las bandas 1-7, excepto la banda térmica 6, con una resolución de 120 m), precisando en mayor medida los píxeles que podrían denotar la presencia de superficie quemada por acción de fuego. Se utilizarán los algoritmos NDVI_d y NBR_d sobre estas imágenes para poder estimar la severidad de un incendio forestal.

Para concluir, este estudio se centrará en el seguimiento de los incendios forestales originados durante el verano de 2003 en la *Raya hispano-lusa* (Extremadura-Alentejo), que se prolongaron durante días y llegaron a arrasarse 17.050 ha de superficie forestal, y en el incendio

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

forestal ocurrido en la comarca cacereña de Las Hurdes entre los días 25 y 31 de julio de 2009, donde se quemó una superficie total de 2.576 hectáreas.

2. Objetivos

Con el presente artículo se intenta demostrar la funcionalidad y capacidades de un sistema de recepción de información satelital a la hora de afrontar estudios de carácter medioambiental aplicados al análisis de eventos relacionados con fenómenos naturales, tales como: inestabilidad atmosférica extrema, emisiones volcánicas a la atmósfera y grandes incendios forestales.

Con la aplicación de la metodología elaborada durante este trabajo se persiguen diversos objetivos que intentan servir de complemento para la toma de decisiones por parte de las administraciones competentes en materia medioambiental. Tal es el caso de la discriminación de grandes borrascas a través de la Teledetección para su seguimiento y evolución, ofreciéndose la información necesaria a la hora de elaborar predicciones meteorológicas lo más precisas posibles que ayuden a mitigar los posibles efectos de estas situaciones atmosféricas sobre la población y el territorio.

De la misma manera, fenómenos naturales, tales como las plumas de cenizas volcánicas, junto con otros gases perjudiciales para el ser humano provenientes de un volcán en erupción, pueden suponer todo un contratiempo a nivel global, causando innumerables pérdidas económicas y/o humanas. Determinar la dirección correcta de las nubes cargadas con ceniza volcánica puede ayudar, por ejemplo, a la planificación estratégica del transporte aéreo y terrestre. Para ello se ha aplicado una metodología estándar, con el propósito de observar el progreso temporal y la dirección exacta de este tipo de fenómenos.

Un gran problema medioambiental de los países mediterráneos durante la etapa estival son, sin duda, los incendios forestales. La última parte de este artículo se dedicará a la aplicación de técnicas cuantitativas para el estudio de los efectos que producen los incendios forestales sobre la vegetación. De este modo, se mostrarán los elementos necesarios para identificar un foco de incendio, desde el momento de su aparición hasta el momento de su extinción, y posterior evaluación de la superficie quemada, haciendo uso de métodos y herramientas que nos proporcionan las tecnologías geoespaciales actuales. Se pretenden exponer los instrumentos necesarios que puedan servir como herramientas de apoyo a la toma de decisiones de los entes autonómicos y locales con competencias en materia medioambiental y de gestión de recursos forestales, piezas que se suponen clave en el entendimiento de toda la problemática que afecta a los bosques de las áreas de ambiente mediterráneo.

Estos fenómenos naturales serán acometidos sobre tres casos de estudio concretos: emisiones del volcán islandés Eyjafjallajokull, que comenzaron a mediados de abril de 2010, "ciclogénesis explosiva" que afectó al continente europeo durante el mes de febrero de 2010 y los incendios forestales ocurridos en la Península Ibérica durante los veranos de 2003 (Extremadura-Alentejo) y 2009 (Las Hurdes, Cáceres).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

3. Metodología

La primera cuestión que se plantea en este estudio es qué imagen satelital es la más adecuada en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal para lograr la consecución de nuestros objetivos. La adquisición de una estación receptora orientada al satélite *Eurobird-9*, por parte del Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible y Planificación Territorial, nos impulsó a utilizar las imágenes del satélite geostacionario *Meteosat-9* que lleva a bordo el sensor SEVIRI, puesto que presenta una excelente resolución temporal al disponer de imágenes cada 15 minutos. Esta característica nos brinda la posibilidad de seguir la evolución de cualquier fenómeno meteorológico casi en tiempo real. La resolución espacial de dicho sensor es de 3 km en todos los canales espectrales, excepto en el de alta resolución que es de 1 km. Para el seguimiento de fenómenos meteorológicos, como borrascas, esta resolución espacial es muy acertada pero para otros desastres, tales como los incendios forestales, esta escala de trabajo no es la más adecuada puesto que para visualizar correctamente la superficie quemada ésta debería ser muy extensa (Nieto *et al.*, 2010).

Otra ventaja que presenta la utilización del sensor SEVIRI es su buena resolución espectral. Este sensor cuenta con doce canales espectrales: uno de ellos de alta resolución denominado HRV (0.5-0.9 μm), dos canales en el espectro visible, uno en el infrarrojo cercano y el resto en el infrarrojo y en el vapor de agua (ver [tabla 1](#)). Las imágenes con las que trabajamos, provenientes de nuestra estación receptora, necesitan un tratamiento posterior, aplicándoles una corrección geométrica y proyectándolas a un sistema de coordenadas conocido. Las imágenes contienen toda la información en Cuentas Digitales (CD) que, posteriormente, serán convertidas a Radiancias (L) al aplicarles una corrección radiométrica. Del mismo modo, se pueden obtener las imágenes del sensor SEVIRI cada 15 minutos, ya corregidas tanto geoméricamente como radiométricamente, a través del servidor que *Eumetsat* pone a disposición en su *web* (<http://archive.eumetsat.int/umarf/>); concretamente se trata del producto denominado "*SEVIRI level 1.5 Image Data*".

Como se ha expuesto previamente, debido al problema de resolución espacial que presenta el satélite geostacionario *Meteosat-9*, nos hemos decantado por la utilización del satélite *Terra*, que lleva a bordo el sensor MODIS, para complementar la información satelital en el estudio de incendios forestales. Entre los diversos canales de adquisición de imágenes de dicho sensor se ha optado por la descarga directa a partir de la dirección FTP que pone a disposición el LAADS (*Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System*) de la NASA en el siguiente enlace: <ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/>

Una vez dentro, se accede al repertorio de todos los datos públicos. Dentro de la colección 5 procedemos a buscar el producto que deseamos descargar. En este caso descargaremos las imágenes MOD02HKM. Este producto contiene las radiancias (expresadas en $\text{W}/(\text{m}^2\text{-}\mu\text{m}\text{-sr})$) calibradas del sensor MODIS/*Terra*, contando con el nivel de procesamiento L1B (*Calibrated Geolocation Data Set*) para sus 36 bandas y con una resolución espacial de 500 m. Otros parámetros adicionales que incluye este tipo de producto MOD02HKM son los indicadores de calidad, las estimaciones de error y los datos de calibración.

Para finalizar, se emplearán imágenes *Landsat TM 5* en la evaluación post-incendio y cálculo de superficie quemada. El satélite *Landsat* se encuentra a una altura orbital de 705 km

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

de distancia con respecto a la Tierra. Posee un periodo orbital de 98,9 minutos, lo que posibilita la toma de información sobre una misma porción de la superficie terrestre cada 16 días en nuestras latitudes (Chuvieco, 2008). El satélite *Landsat* incorpora un explorador de barrido, el TM (*Thematic Mapper*), sensor que posee unas características espectrales y espaciales que, combinadas, hacen que este instrumento sea de gran valía en el estudio de sucesos de carácter periódico en el medio ambiente. El sensor TM ofrece una resolución espacial de 30 m. para las bandas 1-5 y 7, siendo la resolución espacial para la banda térmica (banda 6) de 120 m. Las diferentes franjas del espectro que abarcan cada una de las bandas espectrales del TM vienen indicadas en la [tabla 4](#). Además, este sensor mejora la resolución radiométrica de 6 *bits* (que posee el sensor MSS a bordo de los satélites *Landsat 1- 5*) a 8 *bits*. La adquisición de estas imágenes se ha realizado a través del servicio gratuito (previo registro) GLOVIS (*Global Visualization Viewer*) del USGS, cuyo enlace es: <http://glovis.usgs.gov/>. Esta aplicación, desarrollada en Java, puede ser utilizada desde cualquier navegador *web* de uso común y nos permite seleccionar, mediante una interfaz amigable, el producto, la escena concreta de una determinada fecha y medio y formato de descarga de los datos seleccionados. El empleo de esta información servirá de validación para los resultados obtenidos con las imágenes MODIS, puesto que el sensor TM instalado en la plataforma *Landsat 5* posee una mayor resolución espacial, precisando en mayor medida los píxeles que podrían denotar la presencia de superficie quemada por acción del fuego.

3.1. Detección de emisiones volcánicas

Para el estudio de este primer fenómeno se han usado las imágenes que nos llegan directamente a nuestra estación receptora procedentes del sensor SEVIRI. Para poder tratarlas y procesarlas se aplicaron las correcciones geométricas y radiométricas pertinentes, mediante el *software* gratuito de código abierto *Ilwis 3.6* (<http://52north.org>) y la extensión denominada *Geonetcast Toolbox* desarrollada por el ITC (<http://www.itc.nl>).

El problema real a la hora de detectar las nubes con cargas de ceniza volcánica es la discriminación de éstas. Prata (2009) demostró la utilidad que posee el sensor SEVIRI para detectar fielmente las nubes de ceniza volcánica que un volcán, situado en Yemen, estuvo expulsando durante varios días. Con dicho estudio se demostró que, a pesar de la dispersión de las nubes, llegaron a desplazarse hasta más de 10.000 km. Asimismo, el estudio realizado por Marchese *et al.* (2010) sobre las distintas erupciones del volcán Etna durante el mes de febrero de 2005 resalta las ventajas que presentan los satélites geoestacionarios para el estudio del seguimiento de nubes ceniza volcánica. Tupper *et al.* (2004) estudiaron las explosiones volcánicas más potentes que se han dado recientemente en el Pacífico Occidental y la zona de Indonesia, siendo capaces de realizar el seguimiento de nubes con ceniza volcánica durante 80 horas con el uso del satélite geoestacionario *GMS-5/VISSR*.

Por lo tanto, con las imágenes procedentes del sensor SEVIRI es posible obtener una alta resolución temporal (cada 15 minutos) y espectral (12 canales espectrales), que permite el estudio pormenorizado de fenómenos atmosféricos adversos como las erupciones volcánicas. Por ello, su uso es muy aconsejado en el estudio de la detección y evolución de nubes con ceniza volcánica. (Thomas y Prata, 2011; Clarisse *et al.*, 2010).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

La metodología que se ha empleado para tal fin ha sido la desarrollada por distintos investigadores de *Eumetsat* en otros fenómenos de erupción volcánica. Los métodos formulados por dichos científicos ponen de manifiesto que los canales espectrales más propicios para la detección de nubes de ceniza volcánica son el canal espectral HRV (canal 12) o el canal infrarrojo 3.9 (canal 4). Por ello se utilizaron imágenes de estos canales o el uso combinado de varios canales espectrales, siendo las siguientes:

- Imágenes del canal espectral de alta resolución (HRV) (Kerkmann, y Connel, 2010).
- La diferencia entre el canal 7 (IR 12.0 μm) y el canal 6 (IR 10.8 μm) (Kerkmann *et al.*, 2010).
- Imágenes del canal 4 (IR 3.9 μm) (Kerkmann, y Connel, 2010).
- La diferencia entre el canal 4 (IR 3.9 μm) y el canal 6 (IR 10.8 μm) (Kerkmann, y Connel, 2010).

Otro elemento en los estudios de erupciones volcánicas es la detección de existencia o no de dióxido de azufre (SO₂). Para ello se emplearon las siguientes composiciones:

- La diferencia entre el canal 6 (IR 10.8 μm) y el canal 5 (IR 8.7 μm) (Kerkmann *et al.*, 2010).
- La diferencia entre el canal 9 (WV 7.3 μm) y el canal 11 (IR 13.4 μm) (Kerkmann *et al.*, 2010).

Por último, completamos el estudio realizando una composición RGB (ver [tabla 2](#)), que consiste en la combinación del canal 7 (IR 12.0 μm) - canal 6 (IR10.8 μm); el canal 6 (IR 10.8 μm) - canal 5 (IR 8.7 μm) y el canal 6 (IR10.8 μm) que consiste en la combinación canal 7-6, canal 6-5 y canal 6 (Kerkmann *et al.*, 2010). Esta metodología es la más compleja para detección de nubes cenizas y para la que mejores resultados obtuvimos en nuestro caso de estudio. Con la diferencia del canal 7 y el canal 6 para la combinación de rojo se detectan las nubes de ceniza con una alta concentración de silicato y, sobre todo, se obtiene una discriminación entre la ceniza y las nubes con carga de agua. A ello sumamos la aplicación de la diferencia entre el canal 6 y el canal 5 (verde), con el que se detecta la presencia o ausencia de SO₂. Y, por último, con el canal 6 (azul) se realiza el seguimiento de las nubes de ceniza volcánica de día y de noche. Hay que recordar que con solo el uso del canal 12 (HRV, el que posee la mayor resolución espacial del sensor empleado) no se puede realizar el monitoreo continuo durante las 24 horas, posibilidad que sí nos ofrece este canal infrarrojo.

3.2. Seguimiento de perturbaciones atmosféricas severas

Durante los días 25, 26 y 27 de febrero de 2010 actuó sobre la atmósfera de la Península Ibérica y el centro de Europa una profunda borrasca. Este tipo de sucesos es considerado como "ciclogénesis explosiva" porque, además de desencadenar importantes rachas de viento, viene acompañada de fuertes y localizadas lluvias torrenciales. De nuevo, para el caso de estudio de las borrascas y masas de aire se emplean las imágenes del sensor SEVIRI, siendo nuestro objetivo el seguimiento en tiempo real de perturbaciones atmosféricas severas.

La metodología empleada consistió en dos fases:

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

1. Crear una composición en color verdadero para poder estudiar el escenario que se estaba creando con el paso de dicha perturbación, donde los canales espectrales empleados fueron:

- Banda 3 (rojo): Canal Infrarrojo cercano 1,6 μm
- Banda 2 (verde): Canal visible 0,8 μm
- Banda 1 (azul): Canal visible 0,6 μm

2. Intentar detectar masas de aire con una composición RGB específica, basada en el uso de los canales de vapor de agua y los canales infrarrojos del sensor SEVIRI (Kerkmann, 2010). Esta combinación está diseñada para seguir la evolución de ciclones y, en particular, de fenómenos atmosféricos como la ciclogénesis explosiva. Este es el principal motivo que nos ha llevado a utilizar este método, puesto que es el más adecuado para analizar el paso de la ciclogénesis por la Península Ibérica. La composición RGB para masas de aire se realiza a través de la combinación de los canales WV 6.2, WV 7.3, IR 9.7 y IR 10.8.

Para el canal rojo se realiza la diferencia entre dos canales de vapor de agua, el 8 (WV 6,2 μm) y el 9 (WV 7,3 μm), para intentar detectar zonas de bajas presiones (nubes cargadas de humedad). Con este tipo de combinación espectral no se pueden localizar las masas de aire calientes ni frías, sólo la presencia o ausencia de nubes.

Para el canal verde se realiza la diferencia entre el canal infrarrojo 10 (IR 9,7 μm) y el infrarrojo 6 (IR 10,8 μm) para detectar masas de aire con grandes diferencias de temperatura y, por ello, se utiliza la combinación de canales infrarrojos porque la temperatura de la superficie juega un papel fundamental.

Para el canal azul se emplea de nuevo el canal espectral 8, de vapor de agua (WV 6,2 μm) para localizar zonas con concentración de vapor de agua y, por ello, de humedad.

Como síntesis, se realizará la composición RGB específica con la combinación de los tres canales para una óptima detección y localización de masas de aire (ver [tabla 3](#)) que, además, podremos ir obteniéndolas cada 15 minutos por ser imágenes del sensor SEVIRI y observar, casi en tiempo real, la evolución de estas grandes borrascas.

3.3. Detección y análisis de escenarios de incendios forestales

Para comenzar con nuestro estudio se utilizaron imágenes del sensor SEVIRI en la detección de focos de incendio en tiempo real. A partir de nivel de procesamiento 1,5 se obtienen las temperaturas de brillo para cada imagen infrarroja. Se utilizaron dos cálculos diferentes, por un lado, la utilización del canal 4 (NIR 3,9 μm), que muestra las alteraciones de temperatura en la superficie terrestre, y, por otro lado, la diferencia entre ese canal 4 y el canal 6 (IR 10,8 μm). La ventaja de esta metodología es la obtención en tiempo real de posibles focos de incendios, ya que recibimos de la estación receptora cada 15 minutos imágenes, pero se necesita que tengan una extensión superior a 1,5 ha y temperaturas superiores a 600 K° (Casanova *et al.*, 2004) para poder ser útiles en detección y seguimiento de incendios. En este caso, al ser un incendio de gran magnitud, se pudieron apreciar los focos de incendios y su evolución temporal, pero a la hora de delimitar la superficie afectada se obtienen cifras que no

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

son lo suficientemente precisas, al generalizarse la presencia o no de fuego en píxeles de 3 x 3 km.

Para completar esta resolución temporal con una mayor resolución espacial se utilizaron imágenes MODIS. Con el sensor MODIS de los satélites *Terra* y *Aqua* se obtiene una resolución espacial suficiente (de hasta 500 m en el producto MOD02HKM) que permite delimitar el perímetro de superficie forestal que se está quemando en un gran incendio forestal (Giglio *et al.*, 2006; Justice *et al.*, 2002). Con combinaciones en falso color (bandas 7, 2,1 del producto MOD02HKM) se pueden apreciar los focos de incendios, como en el caso del incendio de la *Raya hispano-lusa* de agosto del 2003 y del incendio de Las Hurdes de agosto del 2009. La utilización de estas imágenes presenta la dificultad de que su obtención no es instantánea sino que se reciben a través del servidor de la NASA una vez que se ha producido el incendio, por lo que su utilización es más óptima para el estudio de escenarios post-incendio.

Por último, para ampliar el estudio de escenarios pre y post-incendio y poder discriminar la superficie quemada y el tipo de usos de suelo que se vieron afectados, se utilizaron imágenes de *Landsat TM 5*. Se calcularon sendos NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), pre y post-incendio, y, posteriormente, se utilizó el método de la diferencia sobre estos valores para poder calcular la superficie abrasada tras el incendio. Para obtener unos datos complementarios de los proporcionados por la diferencia de NDVI, se ha realizado también un NBR (*Normalized Burn Ratio*) sobre las mismas imágenes pre y post-incendio y se ha desarrollado el algoritmo NBR_d , cuyo resultado se ha clasificado según el método no supervisado de *k-means*. Las escenas empleadas tienen el nivel de procesamiento 1T, estando corregidas radiométrica y geoméricamente, contando con la precisión dada con un Modelo Digital de Elevaciones.

El NBR (*Normalized Burn Ratio*) fue definido por Key y Benson (1999) debido a su utilidad en la estimación de la severidad de un incendio forestal. Este índice ya ha sido empleado por diversos autores para el cálculo de la superficie quemada, calculando la diferencia entre el NBR pre-incendio y post-incendio (Key y Benson, 1999; Chuvieco *et al.*, 2002; Martín *et al.*, 2002). Para este estudio se ha calculado, para cada una de las escenas pre y post incendio, el NBR según la expresión:

$$NBR = \frac{TM4 - TM7}{TM4 + TM7}$$

donde:

TM4 = banda 4 del sensor TM para el satélite *Landsat 5*

TM7 = banda 7 del sensor TM para el satélite *Landsat 5*

Tras obtener el NBR de la escena pre-incendio (NBR_{p1}) y post-incendio (NBR_{p2}), se calcula la diferencia entre ambos:

$$NBR_d = NBR_{p1} - NBR_{p2}$$

donde:

NBR_d = diferencia entre NBR pre y post-incendio

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

NBR_{p1} = NBR para la escena pre-incendio

NBR_{p2} = NBR para la escena post-incendio

Para una mejor interpretación de los datos se procedió a la clasificación de los valores según el método *k-means*, estableciendo 7 clases y reclasificando este resultado para obtener únicamente dos clases de superficie: quemada y no quemada.

La hipótesis de que esta metodología para el cálculo de la superficie quemada mejoraba los datos obtenidos por otros índices, como el NDVI, debía ser corroborada. De este modo, se procedió al cálculo de la diferencia del valor del NDVI de la escena pre-incendio respecto a la escena capturada una vez extinguido éste, acometiendo esta tarea de modo que:

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}$$

donde:

TM4 = banda 4 del sensor TM para *Landsat 5*

TM3 = banda 3 del sensor TM para *Landsat 5*

$$NDVI_d = NDVI_{p1} - NDVI_{p2}$$

donde:

$NDVI_d$ = Diferencia de NDVI

$NDVI_{p1}$ = NDVI calculado en base a la escena pre-incendio

$NDVI_{p2}$ = NDVI calculado en base a la escena post-incendio

Este método de las diferencias se basa en la obtención de una imagen que resulta de la diferencia entre el NDVI anterior y posterior al incendio (Quintano *et al.*, 1999). Al igual que se hizo con el NBR, los resultados de la diferencia de NDVI fueron clasificados según el método *k-means* (siendo éste el que mejores resultados arrojaba).

Se realizará un análisis visual y cuantificación de superficie basándose en ambos índices para comprobar el método más exacto de ambos. Es digno de señalar el acierto que tiene la superficie calculada en función del NBR_d , puesto que se ajusta más a la realidad terreno, no generalizando parches (de superficie quemada y no quemada entremezclada), como sí se apreciará en el resultado obtenido a través del $NDVI_d$.

Como método de validación se han comparado las imágenes *Landsat TM 5* con los resultados del sensor MODIS y se ha calculado la superficie afectada en el incendio de Nuñomoral con las mismas. En este sentido, y aunque era de esperar por las capacidades del instrumento TM, se ha denotado una estrecha relación entre la resolución espacial de este sensor y la precisión en las mediciones, identificando con un mayor grado de acierto las superficies que realmente han sido afectadas por el fuego. MODIS encuentra dificultades a la hora de diferenciar espacios no afectados por las llamas (como zonas de contacto con la vegetación quemada) debido, principalmente, a la generalización de la heterogeneidad de la señal espectral

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

contenida para cada píxel que, en este caso, adolece de excesivo tamaño para estas labores de medición.

4. Discusión de resultados

4.1. Los volcanes: el caso del volcán islandés Eyjafjallajökull

Como se ha comentado en la metodología, el primer paso en nuestro estudio fue el uso del canal espectral de alta resolución HRV para detectar la ceniza volcánica, pero nos presentó ciertos inconvenientes, como la dificultad en la detección de las nubes de cenizas finas debido al condicionamiento de la reflectividad de la superficie subyacente y, por ello, la detección de ceniza sólo se distinguía sobre los tonos más oscuros del océano. Por ello, para la localización y evolución de la nube de ceniza del volcán islandés, el uso del canal de alta resolución no nos resultó muy útil, puesto que no se apreciaba con claridad este fenómeno atmosférico.

La siguiente fase fue realizar la combinación de la diferencia entre el canal 7 (IR 12,0 μm) y el canal 6 (IR 10,8 μm), que es propicia para la detección de nubes de cenizas volcánicas con alta concentración de partículas de silicato porque utiliza los canales 6 y 7 que están comprendidos entre la franja del espectro 8 -13 μm . Los valores positivos obtenidos de esta diferencia se traducen en la presencia de nubes de cenizas con una alta concentración de partículas de silicato. Los resultados obtenidos no presentaban altas concentraciones de silicato en el estudio de la erupción del volcán Eyjafjallajökull.

Posteriormente se estudió el comportamiento en el infrarrojo térmico 3,9, muy útil para la detección de ceniza puesto que, durante el día, recoge los valores de reflectancia y de emisividad terrestre y muestra de ello es la [figura 1](#), donde la nube de ceniza se aprecia en una tonalidad más oscura. Con esta metodología obtuvimos mejores resultados.

Para eliminar posibles errores de interpretación se añadió, además, la diferencia entre el canal 4 (IR 3,9 μm) y el canal 9 (IR 10,8 μm), donde esta vez la nube de ceniza se visualizaba en una tonalidad blanca (ver [figura 2](#)) y en la misma localización que el infrarrojo térmico 3,9.

Para la detección de existencia o no de dióxido de azufre (SO_2) en una nube de ceniza se aplicó la resta de los canales IR 10,8 e IR 8,7, siendo este último canal el más útil para discriminar con mayor facilidad la presencia de SO_2 . La diferencia entre el canal espectral 9 (WV 7,3 μm) y el canal 11 (IR 13,4 μm) también nos muestra claramente la existencia de dióxido de azufre. En nuestro caso, la concentración de SO_2 en la nube de ceniza volcánica no fue muy elevada, empleándose los dos métodos (ver [figura 3](#) y [figura 4](#)).

Completamos el estudio siguiendo la metodología propuesta por Kerkmann *et al.* (2010) para una composición RGB (ver [tabla 2](#)). De tal forma que la nube de ceniza volcánica se visualiza en un color rojizo, mientras que la concentración de dióxido de azufre es tan baja que no se aprecia, puesto que no aparece ninguna tonalidad en color verdoso en el área de estudio (ver [figura 5](#)). En estos últimos cálculos fue donde observamos con mayor claridad la evolución de este fenómeno meteorológico durante los primeros días de abril de 2010.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

4.2. Masas de aire: el caso de la ciclogénesis explosiva

Los resultados de la composición RGB en color verdadero con los canales infrarrojo cercano (IR 1,6), y visibles (VIS 0,6 y VIS 0,8) presenta el siguiente aspecto (ver [figura 6](#)). En esta figura las tonalidades verdes se corresponden con la presencia de vegetación vigorosa, los colores marrones y ocres se asocian a la presencia de desierto o suelo desnudo, los océanos muestran una tonalidad oscura y, por último, las nubes que presentan un color azul cian se corresponde con aquellas que tienen una alta concentración de agua y partículas de hielo, mientras que las nubes que muestran un color grisáceo denotan una baja concentración de agua (Rosenfeld, 2010).

Los resultados de las combinaciones para detectar masas de aire con la composición RGB a través de los canales WV 6,2; WV 7,3; IR 9,7 e IR 10,8 (Kerkmann, 2010) se materializa en la obtención de las siguientes imágenes:

- Para el canal rojo con la diferencia entre dos canales de vapor de agua, el 8 (WV 6,2) y el 9 (WV 7,3) aparecen tonalidades claras, denotando la presencia de bajas presiones (nubes cargadas de humedad). Hasta ahora, con este tipo de combinación espectral no se puede localizar las masas de aire calientes ni frías, sólo se puede detectar la presencia o ausencia de nubes (ver [figura 7](#)).
- Para el canal verde con la diferencia entre el canal infrarrojo 10 (IR 9,7) y el infrarrojo 6 (IR 10,8) se pudieron detectar las masas de aire polar y las masas de aire tropical y, así, distinguir la temperatura de la superficie de estas masas de aire (ver [figura 8](#)).
- Para el canal azul se empleó el canal de vapor de agua (WV 6,2), donde localizamos en nuestra área de estudio las zonas que poseen una mayor concentración de vapor de agua y, por ello, de humedad, distinguiéndose con tonalidades claras (ver [figura 9](#)).

Con estos tres análisis previos creamos al final una composición RGB específica para la localización y detección de masas de aire que se observa en la [figura 10](#). Se aprecia claramente la zona de confluencia de la masa de aire caliente, proveniente de África, y la masa de aire frío, que se localiza en el norte europeo, localizándose en la imagen por adquirir una tonalidad verdosa y situada en ese momento sobre la Península Ibérica. Con este resultado final se localiza la zona de confluencia que fue la causante de una perturbación atmosférica, producida en un escaso periodo de tiempo y acompañada de fuertes rachas de viento, lo que provocó las fuertes borrascas de febrero de 2010.

4.3. Incendios forestales: el caso de la *Raya hispano-lusa* y Las Hurdes (Cáceres)

Para demostrar la validez de nuestra metodología se analizaron los incendios forestales ocurridos en la Península Ibérica durante los veranos de 2003 (Extremadura-Alentejo) y 2009 (Las Hurdes, Cáceres). Como hemos expuesto anteriormente, las fases de nuestro estudio se centraron en la detección de focos calientes en tiempo real con imágenes del sensor SEVIRI, detección y cálculo de superficie afectada con imágenes MODIS para ampliar la variable de la resolución espacial y, por último, cuantificar con mayor exactitud la superficie quemada con imágenes *Landsat TM 5* y con la cartografía de *Corine Land Cover* determinar los distintos usos de suelo afectados por incendios.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

Con las imágenes del sensor SEVIRI se procedió a comprobar sus capacidades en la cuantificación de superficie quemada tras el incendio y poder discriminar focos calientes. El canal 4 (NIR 3,9 μm) nos muestra con facilidad las alteraciones de temperaturas emitidas por la superficie terrestre (ver [figura 11](#)). Como se puede apreciar en dicha figura, perteneciente al incendio ocurrido en la comarca cacereña de Las Hurdes en el verano del año 2009, la temperatura registrada en el foco del incendio es mayor (término municipal de Nuñomoral), mientras que las superficies circundantes y las ya quemadas muestran una temperatura alta, aunque menor que la mostrada en el foco del incendio. Este evento se discrimina mejor al hacer la diferencia entre el canal 4 (NIR 3,9 μm) y el canal 9 (IR 10,8 μm) (ver [figura 12](#)). Como es de esperar, debido a la baja resolución espacial del sensor SEVIRI en este canal (3 km), la discriminación de este tipo de fenómenos se ve condicionada por la magnitud del mismo, detectando únicamente aquellos incendios cuya extensión e intensidad sean de gran relevancia y, por ello, el sensor SEVIRI sería capaz de detectar (para la Península Ibérica) incendios cuya extensión sea al menos de 1,5 ha y la temperatura alcanzada de 600 K° (Calle *et al.*, 2003; Calle *et al.*, 2006).

La [figura 13](#) muestra un incendio ocurrido en el año 2003 entre las regiones limítrofes del Alentejo (Portugal) y Extremadura (España), que llegó a prolongarse durante 10 días hasta su extinción. En esta combinación en falso color se aprecia a simple vista la superficie que ya había sido arrasada por el fuego, así como los mismos focos y las columnas de humo.

Con el fin de determinar la superficie quemada de este gran incendio, ocurrido en el entorno de Valencia de Alcántara en el verano de 2003, se ha procedido a calcular el área afectada en la Comunidad Autónoma de Extremadura con imágenes MODIS-Terra. El incendio comenzó el 2 de agosto de 2003 a las 22:00 horas y se extinguió el día 5 de agosto del mismo año a las 22:00 horas. Integrando las imágenes en un SIG, se procede al cálculo de la superficie quemada por el fuego, llegando a contabilizarse 17.050 ha (ver [figura 14](#)). Además, se ha empleado la misma técnica para calcular la zona afectada por el incendio ocurrido en la comarca de Las Hurdes, en Cáceres. El incendio se inició el 25 de julio de 2009 a las 13:25 horas y fue extinguido el 31 de julio del mismo año. Las hectáreas quemadas ascendieron a 3.500 (ver [figura 15](#)).

Apoyándonos en la información proporcionada por el satélite *Landsat TM 5* se ha procedido a estimar la superficie quemada en el incendio forestal ocurrido en la comarca hurdana en el verano del año 2009. Como se ha podido apreciar, según los resultados obtenidos para el cálculo de la superficie total quemada a partir de los índices espectrales expuestos anteriormente, resulta especialmente significativo el resultado obtenido con el método de diferencias de NBR pre y post-incendio (NBR_d), puesto que éste ha conseguido identificar de manera más precisa los píxeles que verdaderamente mostraban vegetación quemada, a diferencia de la superficie obtenida con la diferencia de NDVI (NDVI_d), que presentaba errores, la mayoría de ellos por agregación (generalizando áreas como quemadas cuando en el interior de éstas existían píxeles que representaban superficie no afectada por las llamas), incluyendo píxeles exteriores al perímetro real de la superficie calcinada (ver [figura 16](#)).

La superficie quemada, estimada según los datos obtenidos en base al índice NBR_d calculado en las escenas TM de *Landsat 5* de julio y agosto de 2009 sobre el área de estudio

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

(ver [figura 17](#)), asciende a una cifra de 2.576 ha. De éstas, y según la cartografía proporcionada por el *Corine Land Cover*, más de la mitad de la superficie quemada pertenecería a matorrales, seguido por extensión calcinada de bosques de coníferas (ver [tabla 5](#) y [figura 18](#)).

Hay que destacar que la respuesta espectral de las áreas quemadas es variable por diversos motivos (momento de la captura de la imagen, humedad del terreno, tipo de ecosistema, etc.) (Opazo y Rodríguez-Verdú, 2007), por lo que se deben tener en cuenta ciertos márgenes de error cuando se emplean este tipo de índices.

Para validar los resultados de *Landsat TM 5* con los datos del sensor MODIS se ha calculado la superficie afectada en el incendio de Nuñomoral con las mismas. Los resultados de superficie quemada obtenidos con el sensor MODIS han arrojado una cifra total de superficie afectada por el fuego de 3.725 ha, difiriendo de la cifra dada por el sensor TM del satélite *Landsat*, el cual, tras los resultados obtenidos con la metodología anteriormente expuesta, arroja una cifra de 2.576 ha, es decir, 1.149 ha menos que el resultado obtenido para el sensor MODIS (o lo que es lo mismo, un 30 % menos). Esta amplia diferencia puede explicarse por la mayor resolución espacial que posee el satélite *Landsat* (30 m) que distingue con mayor precisión los píxeles no quemados dentro del perímetro total afectado (como puede ser el caso de formaciones rocosas que se encuentren rodeadas de terrenos devastados por las llamas, pequeñas masas de agua o, simplemente, terrenos a los que el fuego no ha llegado debido a la orografía o cualquier otra circunstancia condicionante). En el caso del sensor MODIS, con una resolución de 500 m, estas superficies no quemadas interiores son, en la mayoría de los casos, ignoradas, fruto de la generalización debida a la menor resolución espacial, siendo erróneamente identificados como píxeles quemados píxeles que, en realidad, representan parcialmente superficies no quemadas.

Esta metodología nos ha proporcionado facilidad en el acceso a la información satelital para el estudio de grandes incendios forestales en las áreas de ambiente mediterráneo, capacidad de algunos sensores en la discriminación y post-evaluación de los efectos producidos por los incendios forestales y el empleo de índices espectrales (NDVI y NBR) en la cuantificación de superficie afectada por los incendios forestales.

5. Conclusiones

Las utilidades que nos ofrece la Teledetección en el campo medioambiental posibilitan la detección, casi en tiempo real, de fenómenos adversos ocurridos en cualquier parte del mundo. Esta cualidad favorece, por una parte, la difusión de información ambiental referida a los riesgos naturales y, por otra, sirve de base en la elaboración de cartografía de riesgos.

En el seguimiento y evolución de diversos fenómenos naturales, como la ciclogénesis explosiva ocurrida en el invierno del año 2010 en Europa, la nube de ceniza del volcán islandés Eyjafjallajokull o los incendios forestales registrados en los últimos años sobre la Península Ibérica, el sensor SEVIRI ha mostrado grandes capacidades en el seguimiento de fenómenos meteorológicos tan dinámicos como pueden ser situaciones de alta inestabilidad atmosférica o trayectoria de emisiones volcánicas en la atmósfera. También este mismo sensor muestra de una

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

forma fehaciente aquellos píxeles que representan focos de incendios forestales activos (en incendios de gran extensión), así como el área circundante afectada.

Por otro lado, se han detectado ciertas limitaciones que atañen a las propiedades de cada sensor empleado, tal es el caso de la discriminación de la fracción de superficie quemada por parte del sensor SEVIRI de la serie de satélites MSG. Los resultados preliminares incentivaron la utilización de otro sensor con mayor resolución espacial, como es el caso de MODIS-Terra, como complemento a la excelente resolución temporal del sensor SEVIRI. Gracias al uso de este producto se han mejorado los resultados obtenidos para el cálculo de la superficie quemada, aproximándose a las cifras obtenidas con el par de imágenes *Landsat TM 5*, donde el empleo de los índices espectrales NDVI y NBR han dado óptimos resultados.

El abaratamiento y los nuevos canales de distribución de las fuentes de información satelital, como es el caso de las imágenes *Landsat* (USGS GLOVIS) o MODIS, han propiciado el desarrollo de este y otros trabajos que se basan en el análisis cuantitativo y cualitativo de imágenes a través de la Teledetección. Además, el creciente desarrollo de herramientas de *software* libre está favoreciendo el manejo de imágenes satelitales para usos muy diversos por parte de la comunidad científica y cualquier usuario interesado.

Como metas de futuro, el grupo de trabajo pretende crear cartografía de riesgos teniendo como base toda la información elaborada y explicada en este presente estudio. Toda esta cartografía se pondría a disposición de los usuarios a través de un portal geográfico que integraría información adicional sobre economía del territorio, sociedad, otras variables físicas de interés, etc. De este modo, se contribuiría al avance de la Sociedad de la Información.

Referencias bibliográficas

- Ayala-Carcedo, J. y Olcina, J. (Coord.) (2002): *Riesgos naturales*. Barcelona, Ariel Ciencia.
- Calle, A.; Casanova; J.L.; Fernández-Alonso, F. y Romo, A. (2001): "Detección de incendios forestales y estimación de riesgo a partir de imágenes SEVIRI sintéticas", en Martínez-Casasnovas, J.A. y Rosell, J.I. (Coord.): *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*. Lleida, Universidad de Lleida, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, pp. 279-282.
- Calle, A.; Gonzalez-Alonso, F. y Merino de Miguel, S. (2003): "Validation of active forest fires detected by MSG-SEVIRI by means of MODIS hot spots and AWiFS images". *International Journal of Remote Sensing*, n° 29:12, pp. 3407-3415.
- Calle, A.; Casanova, J.L. y Romo, A., (2006): "Fire detection and monitoring using MSG Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) data". *Journal of Geophysical Research*, 111, G04S06.
- Carn S.A.; Krotkov N.A.; Yang, K.; Hoff, R.M.; Prata, A.J.; Krueger, J.; Loughlin, S.C. y Level, P.F. (2007): "Extended observations of volcanic SO₂ and sulfate aerosol in the stratosphere". *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7, pp. 2857-2871.
- Casanova, J.L.; Calle, A.; Romo, A. y Sanz, J. (2004): "Forest fire detection and Monitoring by means of an integrated MODIS-MSG System", *Satellite-based fire monitoring network in Northern Eurasia: Methods, Data Products, Applications*. Moscow, Space Research Institute, pp. 409-415.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

Chuvieco Salinero, E. (1999): *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, Berlin, Springer-Verlag.

Chuvieco Salinero, E. (2008): *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Tercera edición. Barcelona, Ariel.

Chuvieco Salinero, E. y Cocero, D. (2004): "Combinación del NDVI y temperatura de superficie para la estimación del contenido de humedad de los combustibles en la valoración del peligro de incendios forestales". *Revista de la Asociación Española de teledetección*, n° 21, pp. 41-46.

Chuvieco Salinero, E. y Martínez Fernández, J. (2003): "Tipologías de incidencia y causalidad de incendios forestales basadas en análisis multivariante". *Ecología*, n° 17, pp. 47-63.

Chuvieco, E.; Martín, M.P. y Palacios, A. (2002): "Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination". *International Journal of Remote Sensing* 23 (23).

Clarisse L.; Prata F.; Jean-Lionel, D.; Clerbaux, C. y Pierre-François, C. (2010): "A correlation method for volcanic ash detection using hyperspectral infrared measurements". *Geophysical Research Letters*, vol. 37, L19806, 5 pp.

Díaz Delgado, R.; Lloret, F. y Ponx, X. (2003): "Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, n° 8, pp. 1751-1763.

Eidenshenk, J. C.; Burgan, R. y Haas, R. (1990): "Monitoring fire fuels condition using time series of advanced very high resolution radiometer data". *Proceedings of Second International Symposium on Advanced Technology in Natural Resource Management*, Washington.

Giglio, L.; Van Der Werf, G.R.; Randerson, J.T.; Collatz, G.J. y Kasibhatla, P.S. (2006): "Global estimation of burned area using MODIS active fire observations". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, pp. 957-974.

Justice, C.O.; Giglio, L.; Korontzi, S.; Owens, J.; Morisette, J.T.; Roy, D.P.; Descloitres, J.; Alleaume, S.; Petitcolin, F. y Kaufman, Y. (2002): "The MODIS Fires Products". *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 244-262.

Kerkmann, J.; Roesli, HP.; Bridge, G. y König, M. (2010): *Applications of Meteosat Second Generation: RGB Composites with channels 01-11 and their interpretation*. [Consulta: 05-05-2010]. Disponible en: <http://oiswww.eumetsat.org/IPPS/html/MSG/RGB/ASH/index.htm>

Kerkmann, J. y Connell, B. (2010): *Applications of Meteosat Second Generation: Volcanic Ash and SO2 detection*. [Consulta: 20-04-2010]. Disponible en: <http://oiswww.eumetsat.org>

Kerkmann, J. (2010): *Applications of Meteosat Second Generation, Airmass RGB*. [Consulta: 25-06-2010]. Disponible en: <http://oiswww.eumetsat.org/IPPS/html/MSG/RGB/AIRMASS/index.htm>

Key, C. y Benson, N. (1999): "The Normalized Burned Ratio, a Landsat TM radiometric index of burn severity incorporating multi-temporal differencing". *U.S. Geological Survey*.

Marchese F.; Ciampa M.; Filizzola, C.; Lacava, T.; Mazzeo, G.; Pergola, N. y Tramutoli, V. (2010): "On the Exportability of Robust Satellite Techniques (RST) for Active Volcano Monitoring". *Remote Sensing*. 2010, 2, pp. 1575-1588.

Martín, M.P.; Díaz-Delgado, R.; Chuvieco, E. y Ventura, G. (2002): "Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS". *IV International Conference on Forest Fire Research. 2002 Wildland Fire Safety Summit*. Millpress, Luso, Coimbra, Portugal.

Miller J.D. y Yool S.R. (2002): "Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data". *Remote Sensing of Environment*, 82, pp. 481-496.

Nieto Masot, A., García Paredes, C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

- Nieto Masot, A.; García Paredes, C. y Fernández Sánchez, A. (2010): "Aplicaciones de los satélites METEOSAT y MODIS para discriminar fenómenos naturales: detección de incendios y puntos calientes, evolución de borrascas, ciclogénesis explosiva y cenizas volcánicas", en Ojeda, J.; Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.). *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. pp. 942-955. ISBN: 978-84-472-1294-1
- Olcina Cantos, J. y Ayala Carcedo, F. J (2007): *Riesgos naturales y desarrollo sostenible: impacto, predicción y mitigación*. Madrid, Instituto Tecnológico y Geominero de España.
- Opazo, S y Rodríguez-Verdú, F. (2007): "Variación espacial de índices espectrales sobre áreas quemadas en Sudamérica". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 33.
- Padilla, M. y Chuvieco Salinero, E. (2009): "Validación de productos globales de área quemada en la Península Ibérica". *Revista de la Asociación Española de teledetección*, n°. 31, pp. 69-79.
- Prata A.J. y Kerkmann J. (2007): "Simultaneous retrieval of volcanic ash and SO₂ using MSG-SEVIRI measurements". *Geophysical Research Letters*, vol. 34, L05813, 6 pp.
- Prata J. (2009): "Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic". *Natural Hazards*, 51, pp. 303-324.
- Quintano, E.; Delgado, J.A.; Fernández, A. e Illera, P. (1999): "Cartografía automática de grandes incendios forestales con imágenes Landsat". *VIII Congreso Nacional de Teledetección. Avances y aplicaciones*, Albacete, España.
- Rosenfeld, D. (2010): "Day Natural Colours RGB". [Consulta: 14-05-2010]. Disponible en: <http://oiswww.eumetsat.org/IPPS/html/MSG/RGB/NATURALCOLOR/index.htm>
- Ruiz-Gallardo, J.R.; Quintanilla, A. y Castaño, S. (2003): "Teledetección y SIG en la gestión post-incendio forestal. El caso de Almansa (Albacete)". *Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledetección*, Cáceres, España, pp. 183-186.
- Thomas H.E. y Prata A.J. (2011): "Sulphur dioxide as a volcanic ash proxy during the April–May 2010 eruption of Eyjafjallajökull Volcano (Iceland)". *Journal Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, pp. 7757-7780.
- Tupper A.; Carn S.; Davey, J.; Kamada, Y.; Potts, R.; Prata, F. y Tokuno, M. (2004): "An evaluation of volcanic cloud detection techniques during recent significant eruptions in the western „Ring of Fire“". *Remote Sensing of Environment*, 91, pp. 27-46.
- Tupper A.; Davey J.; Stewart, P.; Stunder, B.; Servranckx, R. y Prata, F. (2006): "Aircraft encounters with volcanic clouds over Micronesia, Oceania, 2002-03". *Australian Meteorological Magazine*, 55, pp. 289-299.
- Tupper A.; Textor, C.; Herzog, M.; Hans, F.G. y Richards, M. (2009): "Tall clouds from small eruptions: the sensitivity of eruption height and fine ash content to tropospheric instability". *Natural Hazards*, 51, pp. 375-401.
- Watson I.M.; Realmuto V.J.; Rose, W.I.; Prata, A.J.; Bluth, G.J.S.; Gua, Y.; Bader, C.E. y Yu, T. (2004): "Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging spectroradiometer". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135, pp. 75-89.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

TABLAS

Tabla 1. Resolución espectral de los canales del sensor SEVIRI

Canal	Canal espectral	Rango espectral medio (μm)	Rango espectral (μm)	Resolución espacial (km)
1	VIS 0,6	0,635	0,56 - 0,71	3
2	VIS 0,8	0,81	0,74 - 0,88	3
3	IR 1,6	1,64	1,50 - 1,78	3
4	IR 3,9	3,92	3,48 - 4,36	3
5	IR 8,7	8,70	8,30 - 9,10	3
6	IR 10,8	10,8	9,80 - 11,80	3
7	IR 12,0	12,0	11,00 - 13,00	3
8	WV 6,2	6,25	5,35 - 7,15	3
9	WV 7,3	7,35	6,85 - 7,85	3
10	IR 9,7	9,66	9,38 - 9,94	3
11	IR 13,4	13,40	12,40 - 14,40	3
12	HRV		0,5 - 0,9	1

Fuente: Eumetsat

Tabla 2. Composición RGB para la detección de nubes de ceniza volcánica

Banda espectral	Canales espectrales	Rangos mínimos y máximos
Banda 1 (Rojo)	IR 12,0 - IR 10,8	- 4 K / +2 K
Banda 2 (Verde)	IR 10,8 - IR 8,7	- 4 K / + 5 K
Banda 3 (Azul)	IR 10,8	243 / 303 K

Fuente: Kerkmann *et al.* (2010)

Tabla 3. Composición RGB para la detección de borrascas y masas de aire

Banda espectral	Canales espectrales	Rangos mínimos y máximos
Banda 1 (Rojo)	WV 6,2 - WV 7,3	- 25 K / 0 K
Banda 2 (Verde)	IR 9,7 - IR 10,8	- 40 K / + 5 K
Banda 3 (Azul)	WV 6,2	243 / 208 K

Fuente: Kerkmann (2010)

Tabla 4. Bandas espectrales para el sensor TM de Landsat 5

Banda (TM)	Rango (μ)	Resolución espacial (m)
1	0,45 - 0,52 μ (blue)	30
2	0,52 - 0,60 μ (green)	30
3	0,63 - 0,69 μ (red)	30
4	0,76 - 0,90 μ (NIR)	30
5	1,55 - 1,75 μ (SWIR)	30
6	10,40 - 12,50 μ (TIR)	120
7	2,08 - 2,35 μ (SWIR)	30

Fuente: Elaboración propia a partir de United States Geological Survey (USGS)

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

Tabla 5. Porcentaje de superficie quemada según tipo de uso

Uso	% superficie
Olivares	3,04
Mosaico de cultivos	0,15
Terrenos principalmente agrícolas, pero con espacios de vegetación	1,64
Bosques de frondosas	0,31
Bosques de coníferas	14,52
Matorrales esclerófilos	61,76
Matorral boscoso de transición	18,57

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de *Corine Land Cover 2006*

FIGURAS

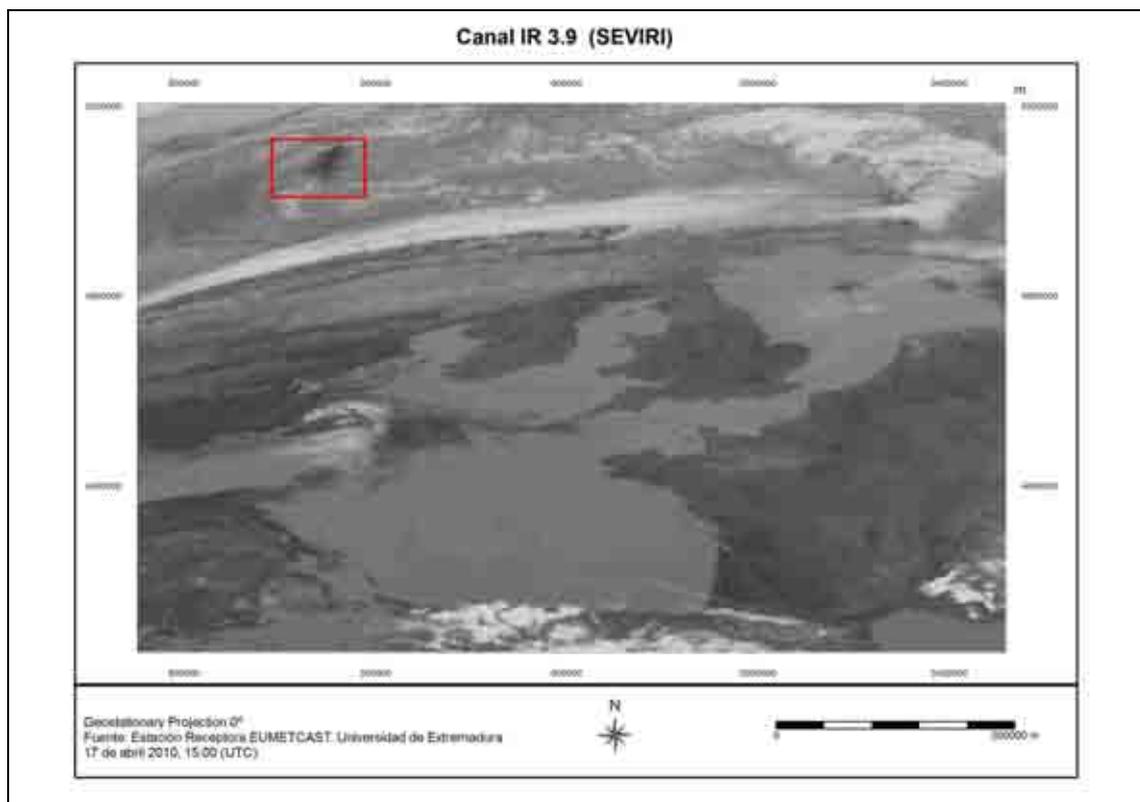


Figura 1. Detección de nubes de ceniza con MSG (SEVIRI). IR 3,9.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

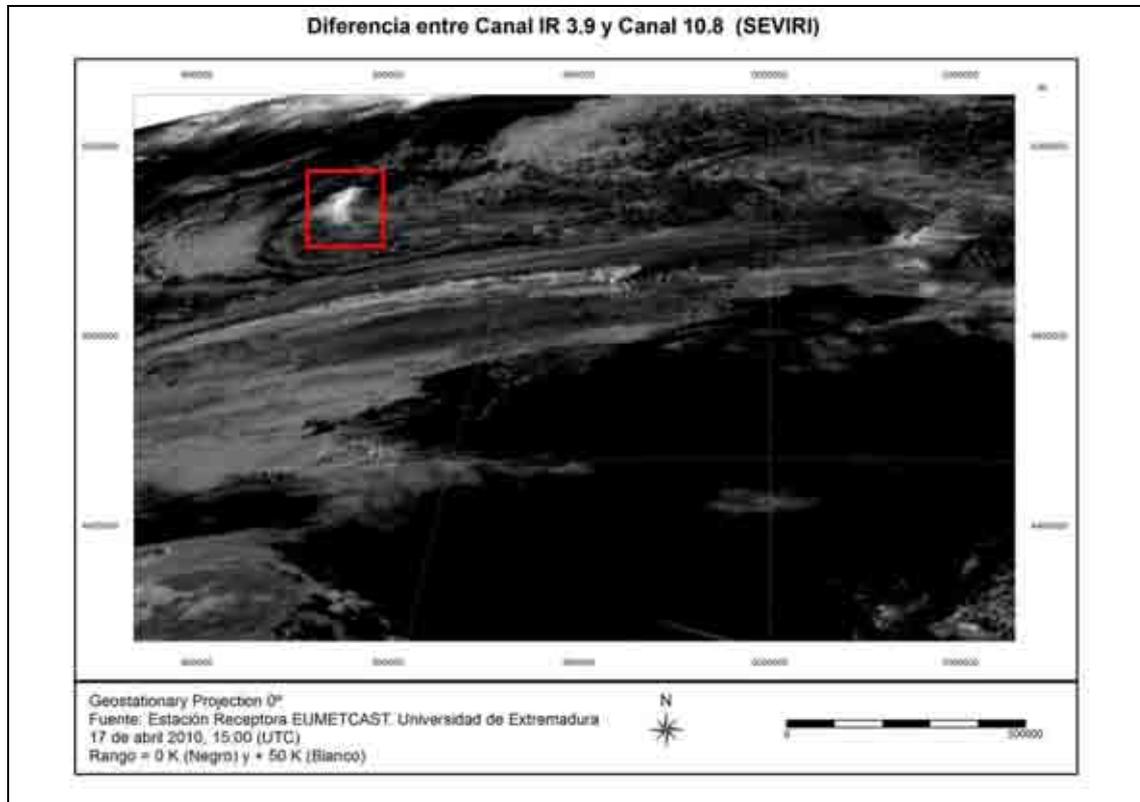


Figura 2. Detección de nubes de ceniza con MSG (SEVIRI). IR 3,9-10,8

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

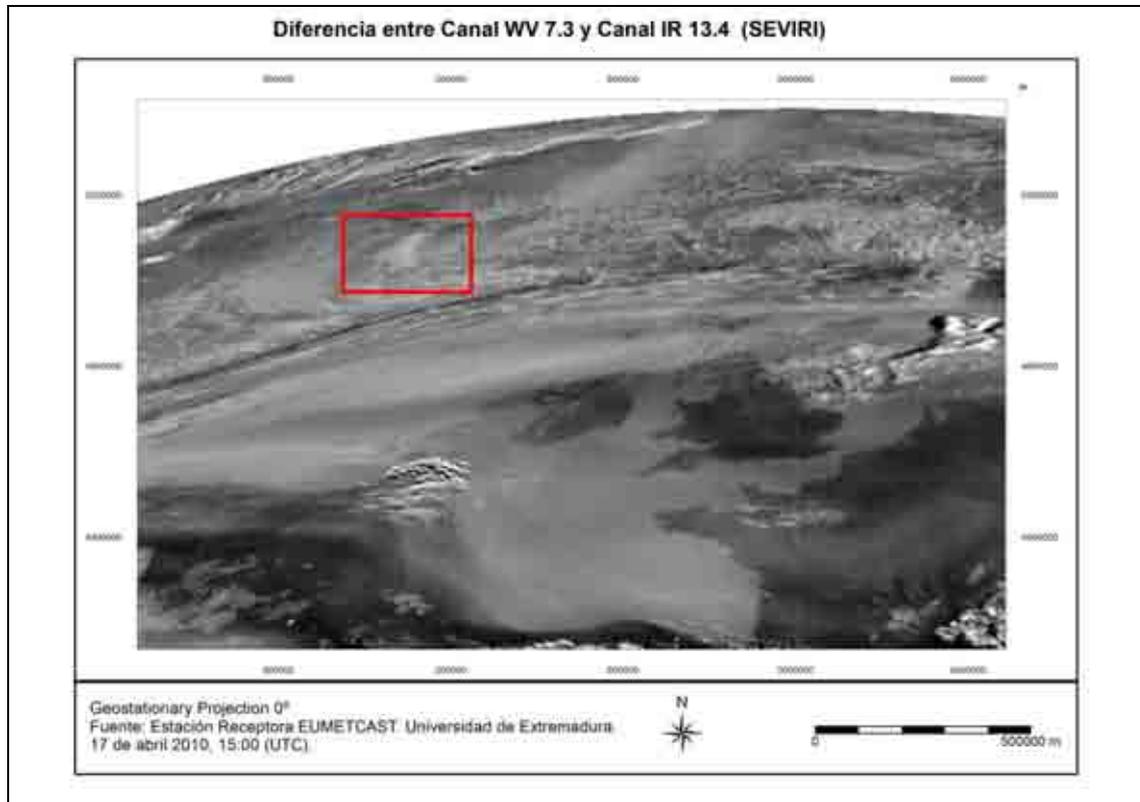


Figura 3. Detección de existencia de SO₂ con MSG (SEVIRI). WV 7,3-IR 13,4.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

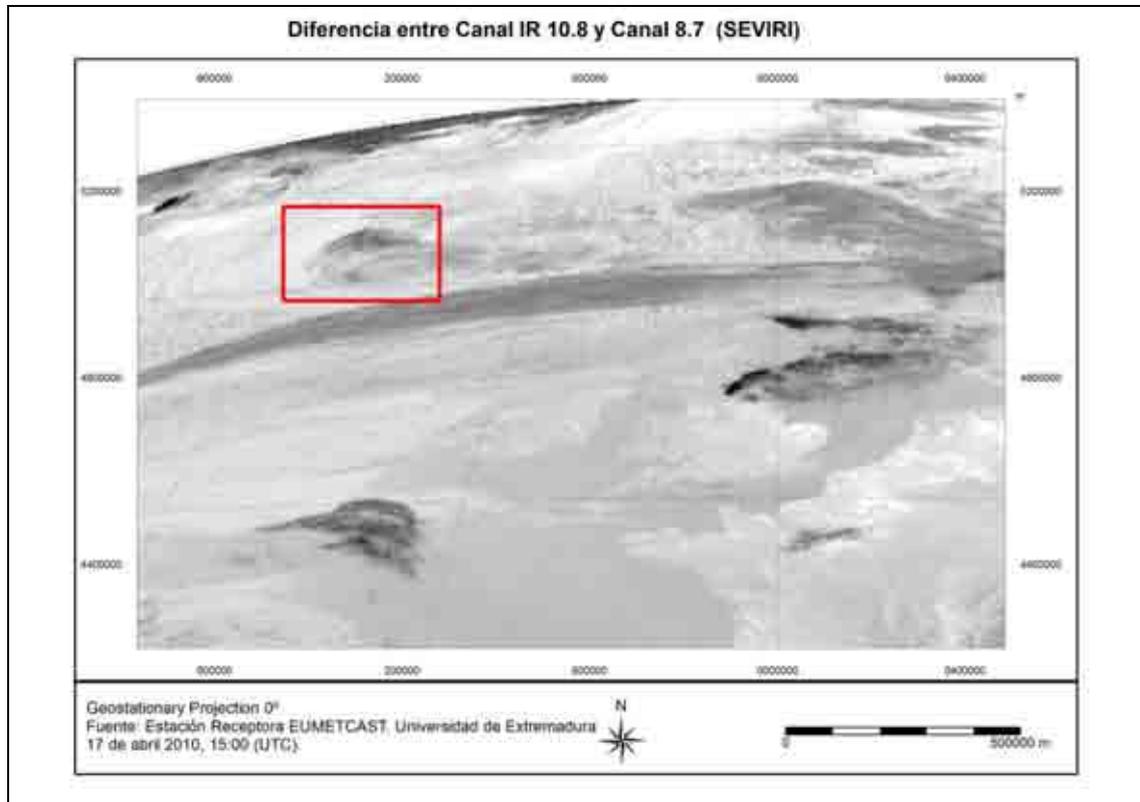


Figura 4. Detección de existencia de SO₂ con MSG (SEVIRI). IR 10.8-8,7.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

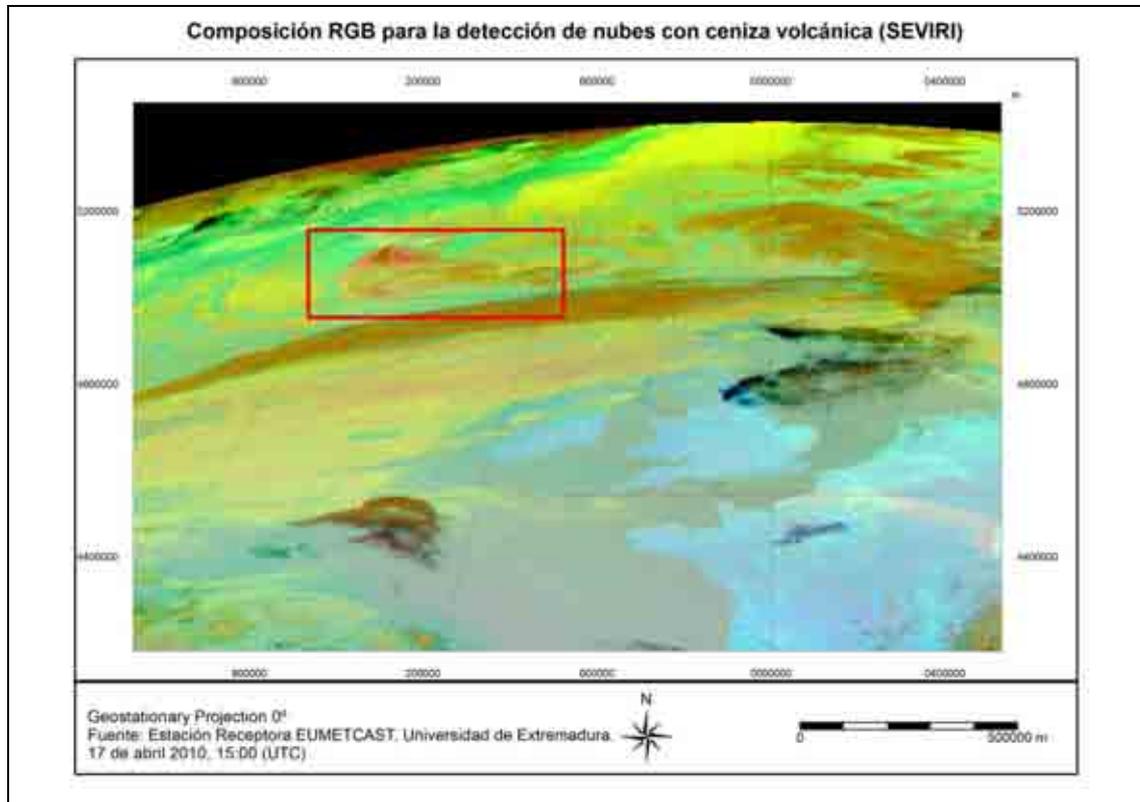


Figura 5. Detección de nube de ceniza con MSG (SEVIRI). Composición RGB siguiendo a Kerkmann, et al. (2010).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

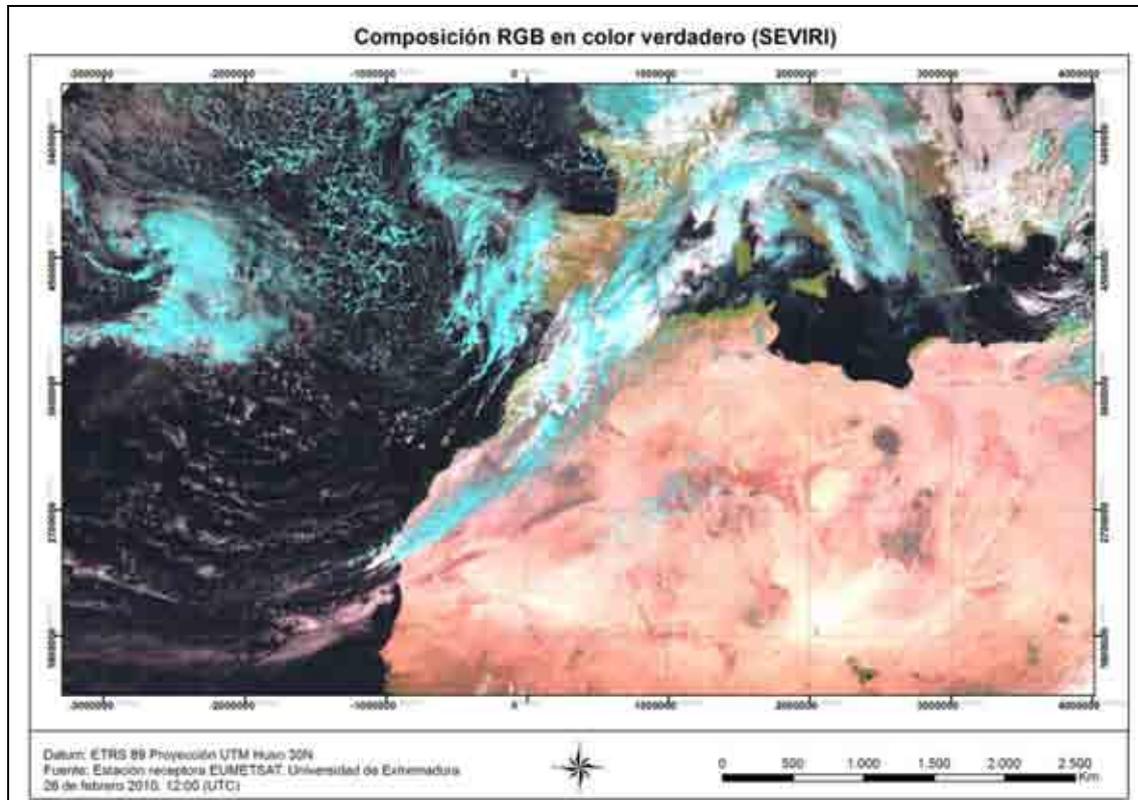


Figura 6. Localización de ciclogénesis explosiva con MSG (SEVIRI). Composición RGB en color verdadero.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

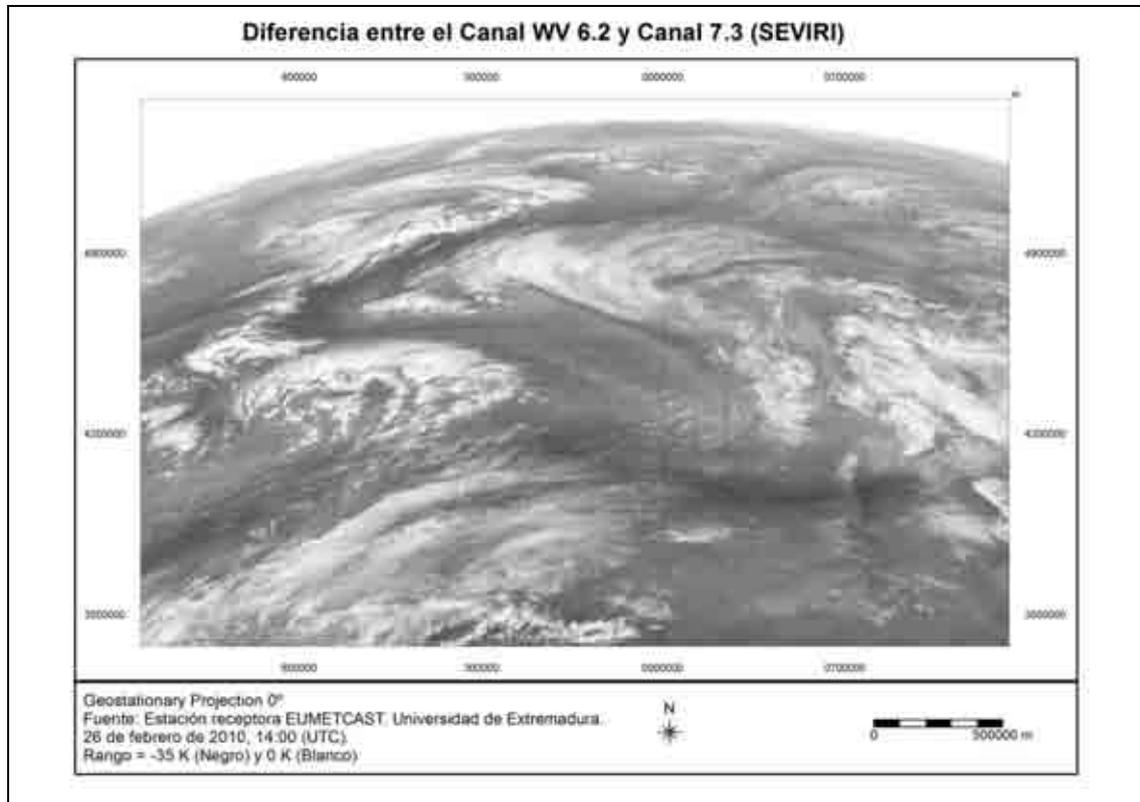


Figura 7. Localización de ciclogénesis explosiva con MSG (SEVIRI). WV 6,2-7,3.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

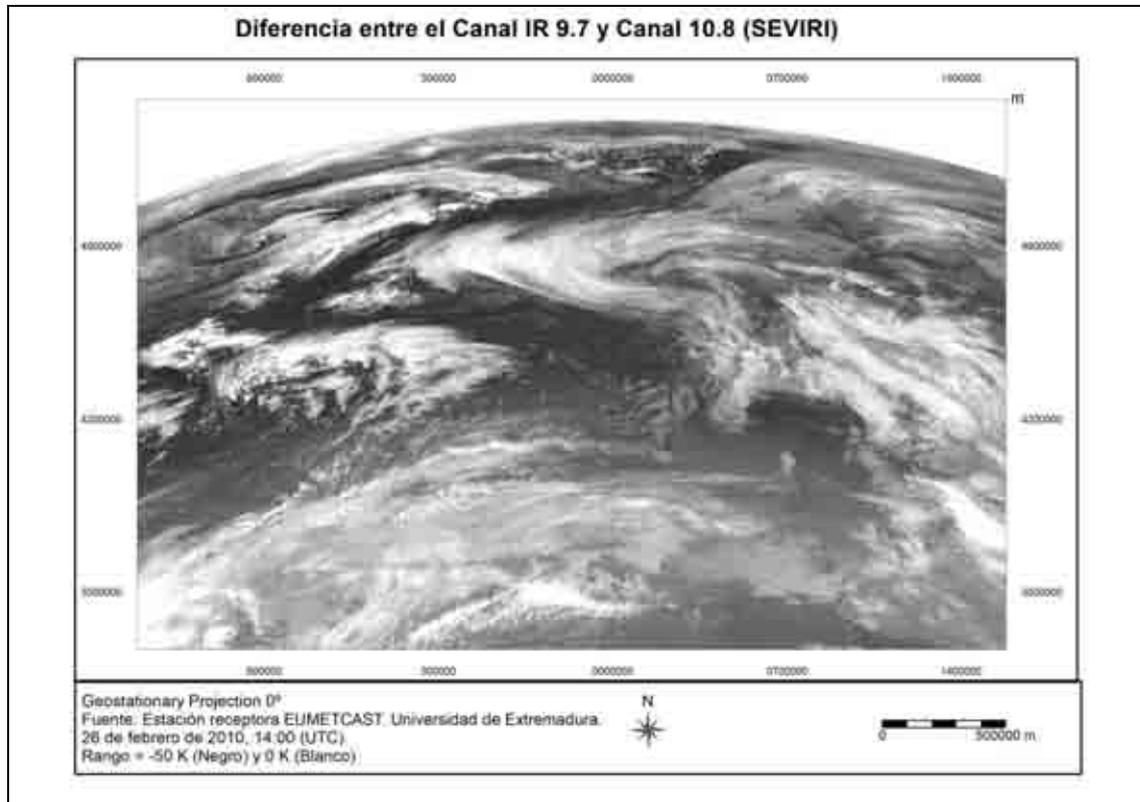


Figura 8. Localización de ciclogénesis explosiva con MSG (SEVIRI). IR 9,7-IR 10,8.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

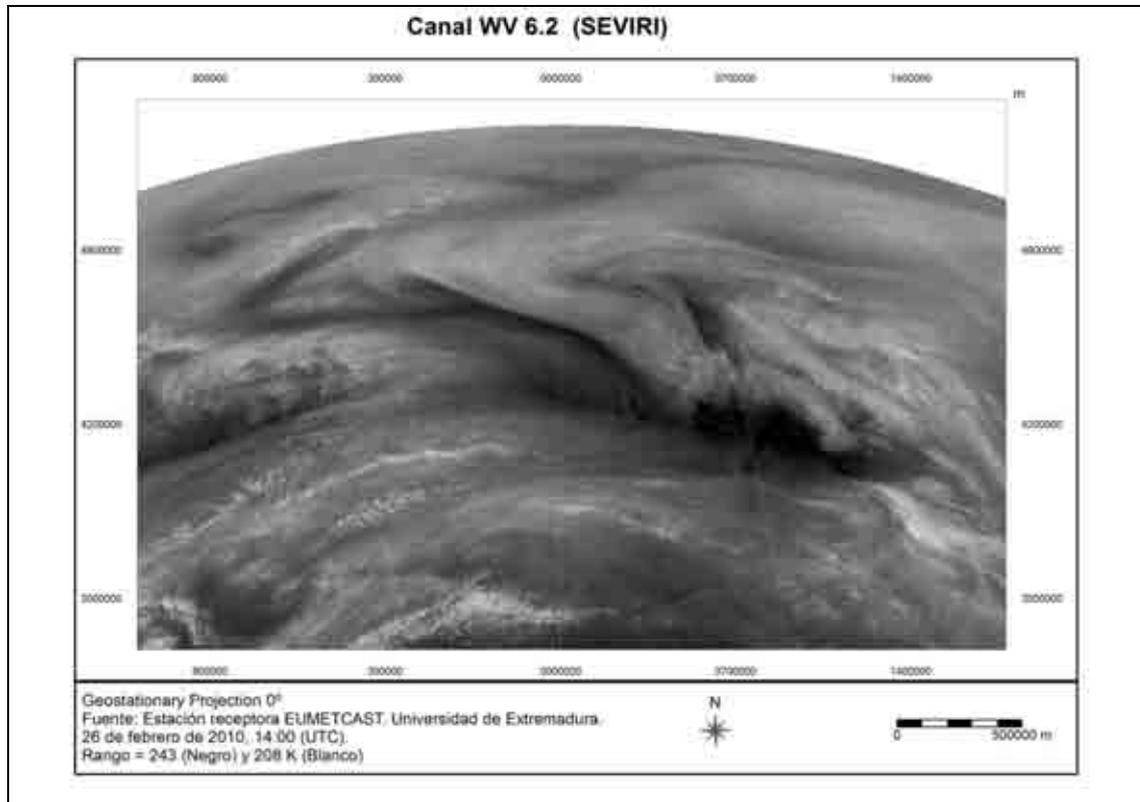


Figura 9. Localización de ciclogénesis explosiva con MSG (SEVIRI). WV 6,2.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

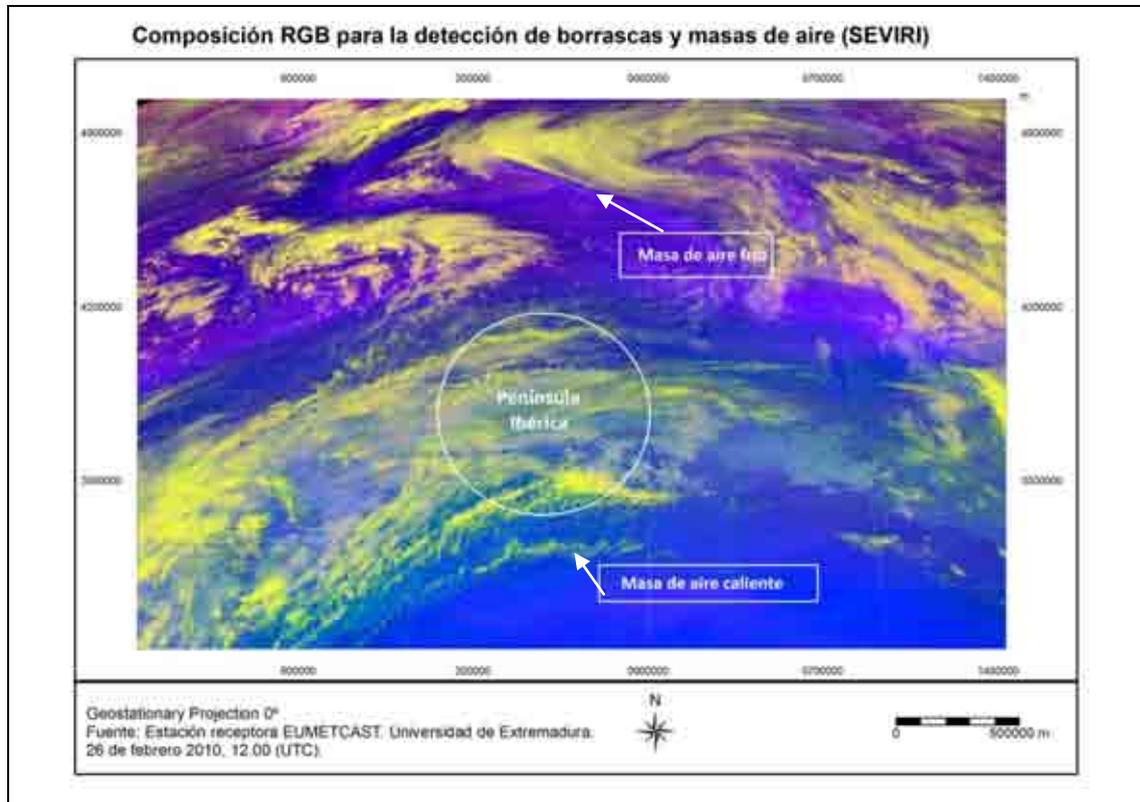


Figura 10. Localización de ciclogénesis explosiva con MSG (SEVIRI). Composición RGB.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

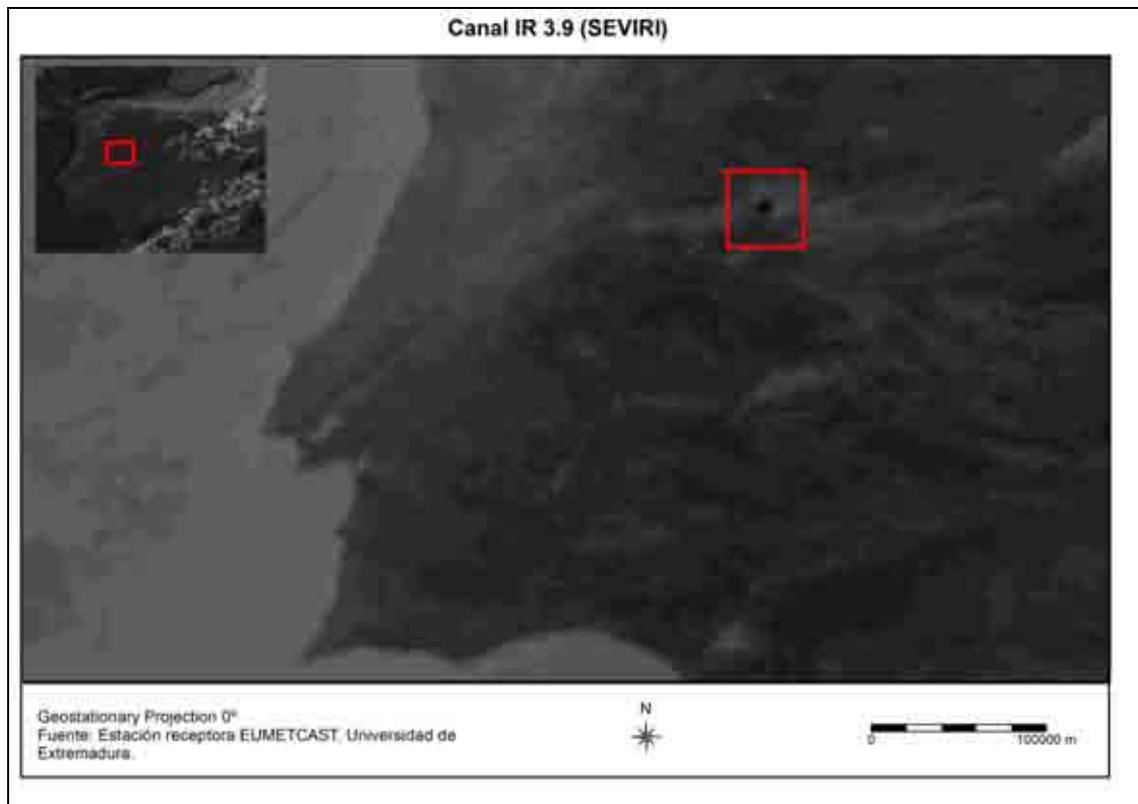


Figura 11. Localización del incendio de Nuñomoral (2009) con MSG (SEVIRI)-Canal 4 (IR 3,9 μm).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

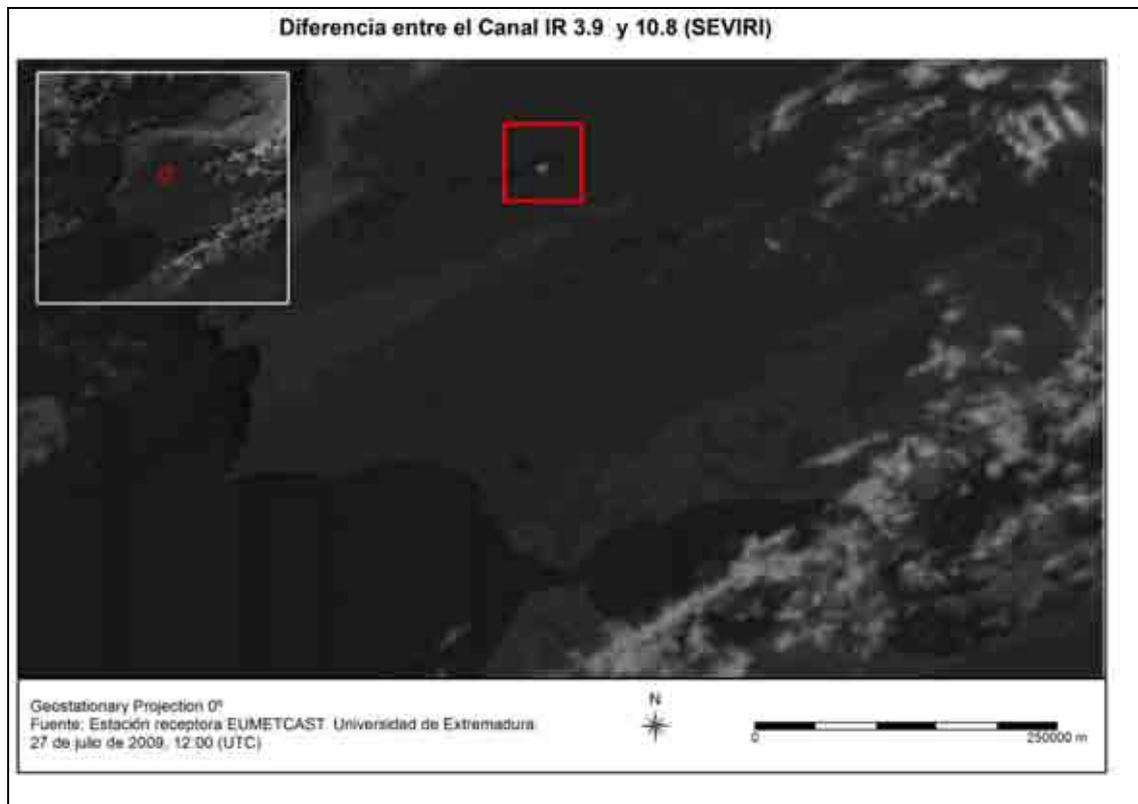


Figura 12. Localización del incendio de Nuñomoral (2009) con MSG (SEVIRI). IR 3,9 - IR 10,8.

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157



Figura 13. Localización del incendio de Valencia de Alcántara (2003) con Imagen MODIS-Terra (NASA).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

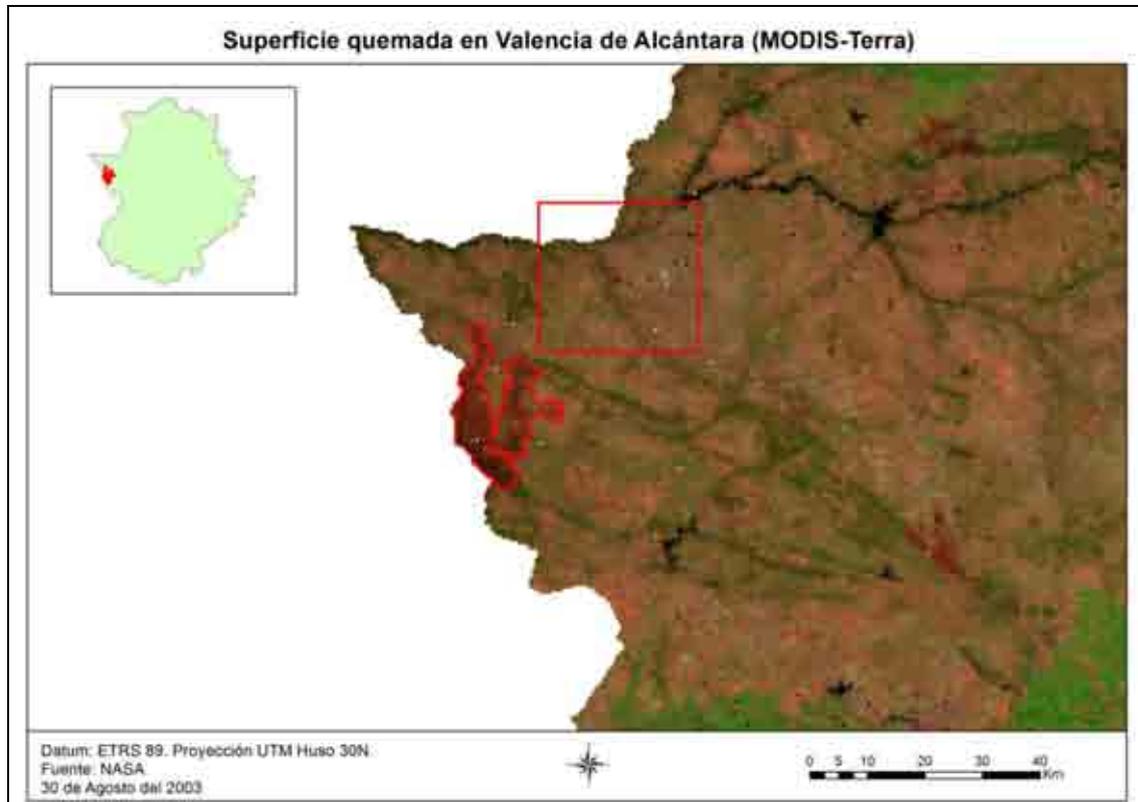


Figura 14. Superficie afectada por el incendio de Valencia de Alcántara (MODIS-Terra).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157



Figura 15. Superficie afectada por el incendio de Nuñomoral (MODIS-Terra).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

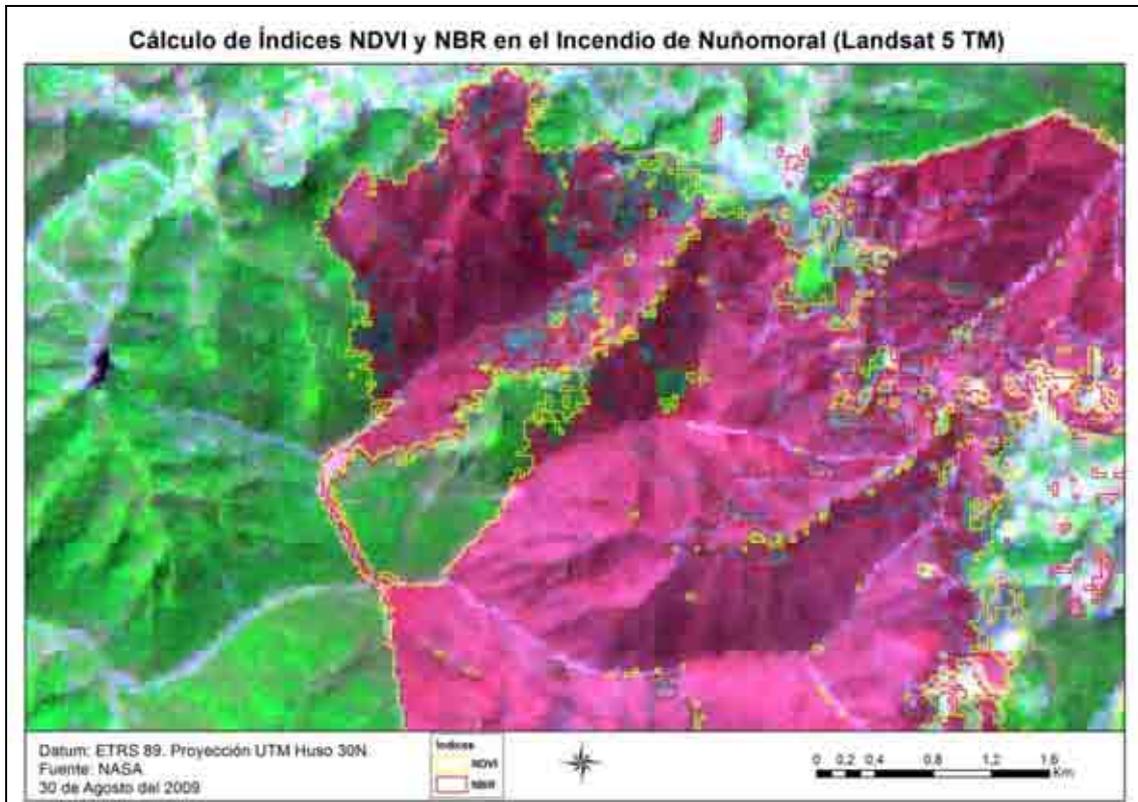


Figura 16. Cálculo de índices $NDVI_d$ y NBR_d en el incendio de Nuñomoral (*Landsat 5 TM*).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

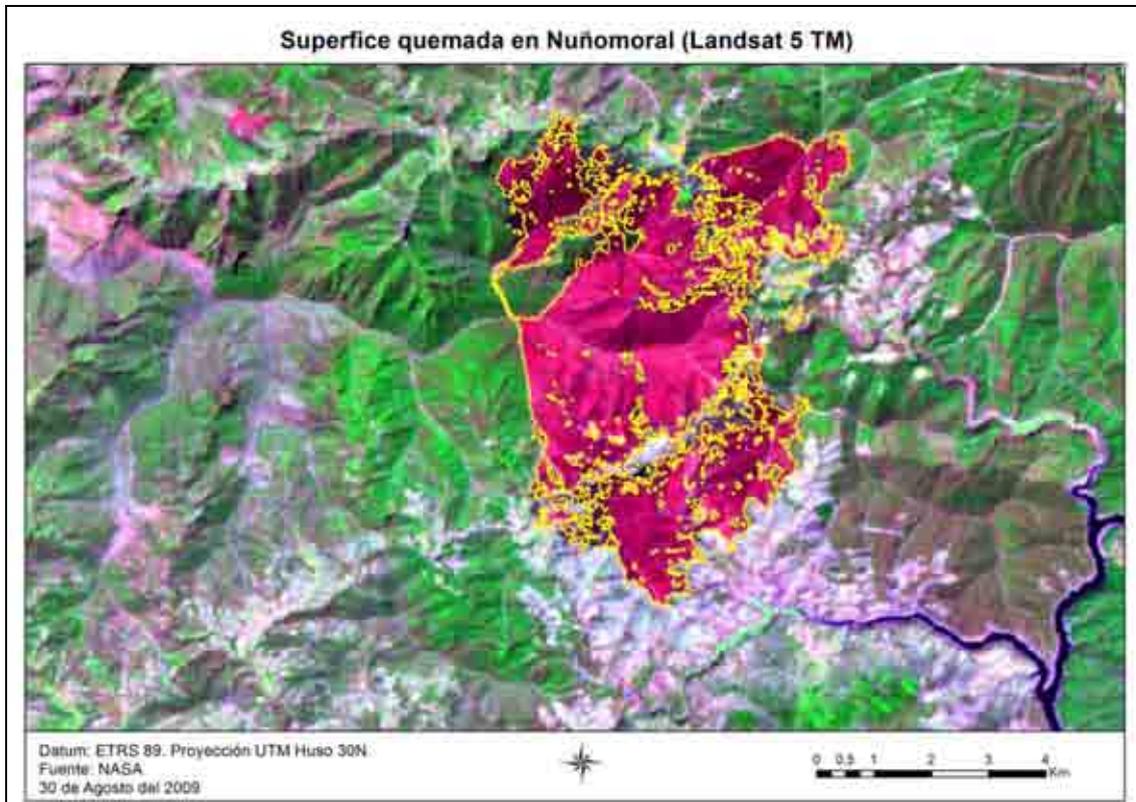


Figura 17. Superficie afectada por el incendio de Nuñomoral según índice NBR_d (Landsat TM 5).

Nieto Masot, A., García Paredes C. y Fernández Sánchez, A. (2011): "Estudio de casos para detección y análisis de fenómenos naturales con imágenes de SEVIRI, MODIS y LANDSAT TM 5: emisiones volcánicas, ciclogénesis explosivas y grandes incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 11, p. 375-408. ISSN: 1578-5157

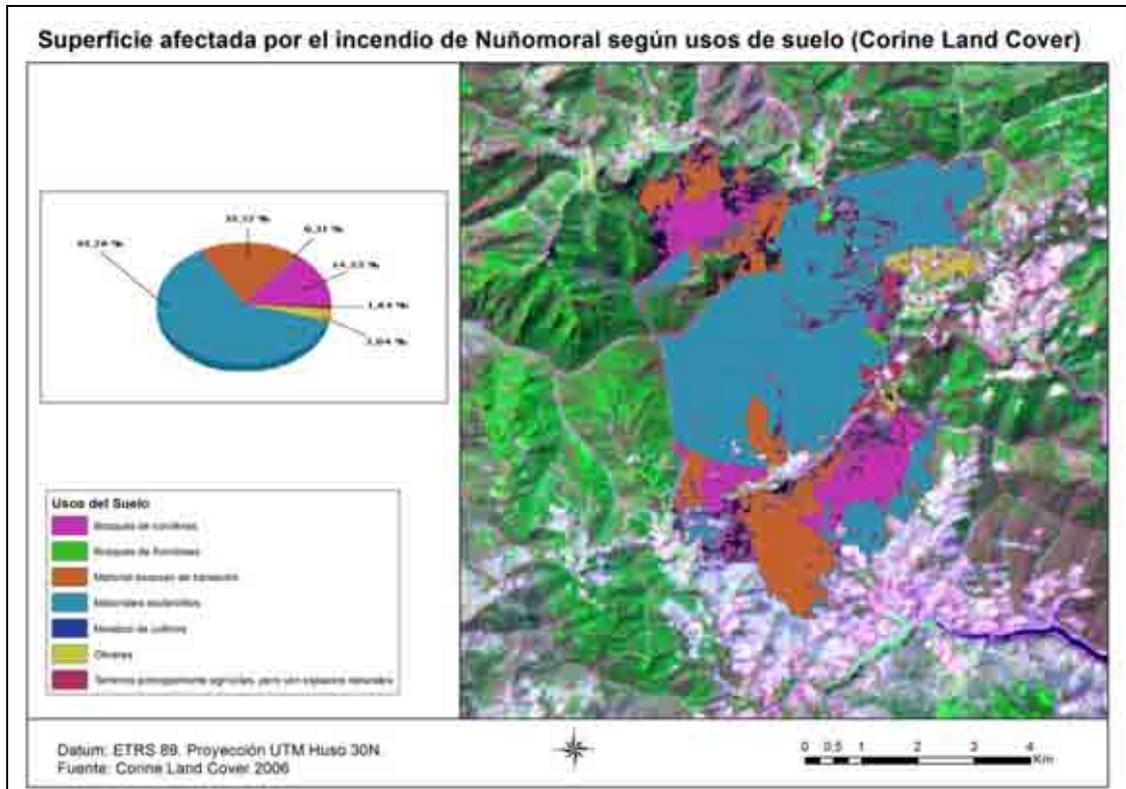


Figura 18. Superficie afectada por el incendio de Nuñomoral según índice NBR_d (Landsat TM 5) y usos del suelo (Corine Land Cover 2006).