

Detección y cuantificación de área quemada por incendios forestales utilizando geomática

Detection and quantification of burnt area by forest fires utilizing Geomatics

John Gajardo Valenzuela¹

Carlos Mena Frau²

Yony Ormazábal Rojas³

Yohana Morales Hernández⁴

Resumen

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) es la entidad a nivel nacional, encargada de proteger los ecosistemas forestales de los agentes y procesos dañinos como la desertificación, el fuego y otras formas de deterioro. En Chile la mayoría de los incendios forestales son producidos por el hombre, generando un daño promedio anual de 50.000 hectáreas. Aunque la mayoría de los incendios producidos no sobrepasa las 10 hectáreas, surge la necesidad de contar con estadísticas fiables y cuantificar de forma adecuada los grandes siniestros que se producen en zonas con poca o nula accesibilidad. En este contexto, el uso de datos provenientes de plataformas satelitales (NOAA-AVHRR, TERRA/AQUA-MODIS) ha mostrado ya su utilidad en el estudio de estos fenómenos a escala regional. En este trabajo se ha estudiado la aplicación de imágenes de dos sensores ETM+ y ASTER para la evaluación de índices espectrales y algoritmos de crecimiento de regiones con el objetivo de discriminar y cartografiar un incendio ocurrido en la cordillera de la Región del Maule, Chile. Los resultados indican que el uso de un algoritmo de crecimiento de regiones, mostró los mejores resultados (Fiabilidad = 97%, Kappa = 80.6%) por sobre las segmentaciones de los índices NDVI, BAI y NBR. Aunque los resultados son auspiciosos, se presentaron algunos inconvenientes relacionados a la correcta delimitación e inclusión de la totalidad de la zona quemada, lo anterior puede ser mejorado trabajando

1 Centro de Geomática. Universidad de Talca. Casilla 747, Talca. Chile; jgajardo@utalca.cl

2 Centro de Geomática. Universidad de Talca. Casilla 747, Talca. Chile; cmena@utalca.cl

3 Centro de Geomática. Universidad de Talca. Casilla 747, Talca. Chile; yormazabal@utalca.cl

4 Centro de Geomática. Universidad de Talca. Casilla 747, Talca. Chile; ymorales@utalca.cl

con imágenes de mayor resolución espacial, cuya data sea más reciente a la fecha del incendio y eliminado algunas fuentes de confusión como el sombreado topográfico.

Palabras clave: incendios forestales; área quemada; índices espectrales; segmentación.

Abstract

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) is the organization at national level, ordered to protect the forest ecosystems of the agents and harmful processes like desertification, fire and other forms of deterioration. In Chile most of wild fires is produced by the man, having generated a damage annual average of 50,000 hectares. Although the majority of fires does not exceed 10 hectares, arises the necessity to count on trustworthy statistics and to quantify of suitable form the great wildfires that take place in zones without accessibility. In this context, the use of remote sensing data from satellite platforms (NOAA-AVHRR, TERRA-MODIS) has already shown its utility in the study of these phenomena at regional scale. In this work the application of images of two sensors ETM+ and ASTER with spectral index and regional grown algorithm was tested to discriminate and mapping a fire in the mountains of Maule Region in Chile. The results indicate of region grown algorithm, showed the best results (Reliability =97%, Kappa =80.6%) over spectral index (NDVI, BAI, NBR) segmentations. Although results are favorable, appear some disadvantages related to the correct boundary and inclusion of burned zone, this can be improved using recent data next to fire date and correcting some confusion sources like topographic shaded.

Key words: wildfires; burnt area; spectral indices; segmentation.

Introducción

El continente Sudamericano presenta en la actualidad una de las más elevadas tasas de pérdida de bosques, 0.51% para el período comprendido entre 2000 y 2005 (FAO, 2007). Además, es una región que posee una alta incidencia de incendios forestales, cuya frecuencia, magnitud e intensidad, dependen de varios factores

influenciados por el medioambiente y el accionar del hombre (DI BELLA et al., 2006). En Chile, se declaran en promedio 5.471 incendios forestales, que afectan a una superficie media de 52.254 ha/año aproximadamente (HATTENHOF, 1998). Aunque la problemática de los incendios forestales es abordada desde diversas perspectivas dependiendo del país donde se estudia, autores (CHUVIECO, 2002;

KEY y BENSON, 1999; MILLER y YOOL, 2002) concuerdan en un punto en común, la necesidad de contar con estadísticas válidas y precisas que permitan evaluar las pérdidas económicas y los efectos ecológicos, así como el monitoreo de los cambios en los usos de la tierra y los impactos que produce en el clima el fenómeno del incendio forestal. Tradicionalmente, los métodos empleados para cartografiar incendios forestales consistían en levantamientos de terreno, que presentan los inconvenientes de ser demasiado costosos y poco precisos para casos de grandes incendios. En los últimos años el uso de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) montados sobre helicópteros ha sido una buena alternativa para paliar esta dificultad. Sin embargo, este método depende en demasía de la pericia del piloto y no permite obtener información acerca de las pequeñas islas y parches de vegetación no quemadas que se encuentran al interior del perímetro afectado (GARCÍA y CHUVIECO, 2004).

Comúnmente, las zonas montañosas que son afectadas por incendios forestales suelen presentar una gran extensión y en la mayoría de los casos, limitadas o ninguna vía de accesibilidad. En este contexto, el uso de imágenes capturadas a través de plataformas satelitales se convierte en una interesante alternativa que permite recopilar la información requerida en forma oportuna y de manera metodológicamente consistente (PEREIRA et al. 1999). De esta forma, el uso de imágenes satelitales para el monitoreo y cartografía de incendios forestales se ha incrementado considerablemente. La mayoría de estas experiencias han sido llevadas a cabo

empleando sensores de baja resolución como el *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), *Vegetation, Along Track Scanning Radiometer* (ATSR) y en forma más reciente el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Por otro lado, se han llevado también experiencias con sensores de mayor resolución, entre éstos Landsat ETM+ y TM, siendo este último uno de los más ampliamente utilizados (CHUVIECO et al., 2002). Sin embargo, durante el último tiempo los estudios de incendios forestales a escala regional, han tenido que lidiar con los múltiples problemas que ha presentado el sensor Landsat ETM+, está razón (falla del *Scan Line Corrector*) ha llevado a los investigadores a emplear imágenes de otros sensores como el *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) montado en la plataforma TERRA, el cual aunque no fue diseñado para tales fines, ha presentado una gran utilidad y mejoría de los resultados en esta problemática, al recoger información en la región *Near Infrared* (NIR)/*Short Wave Infrared* (SWIR), espacio biespectral que ha demostrado ser más útil que el tradicional *Visible*(VIS)/*Near Infrared* (NIR) para la discriminación de áreas quemadas (CSISZAR et al., 2004; PEREIRA et al., 1999).

Aunque los resultados de las investigaciones realizadas con imágenes satelitales son auspiciosos, las técnicas presentan algunas restricciones que deberían ser consideradas a la hora de ser empleadas. Entre éstas se encuentran: la resolución temporal del sensor, que repercute en la persistencia de la señal

del carbón; la cobertura de nube de las imágenes; la resolución espacial que determinará el tamaño mínimo de los incendios que se detectarán; y finalmente la resolución espectral del sensor, aspecto clave para detectar áreas quemadas y evitar confusiones con otras cubiertas que presenten similar respuesta espectral (GARCÍA y CHUVIECO, 2004).

El presente trabajo se inscribe en la línea de estimación de área quemada a escala local. La investigación fue realizada sobre dos imágenes, una imagen Landsat ETM+ anterior al incendio y otra imagen TERRA - ASTER posterior al siniestro ocurrido los días 25 a 30 de Mayo de 2007 en la zona de La Candelaria, ubicada a 23 km de la localidad de Los Queñes, Curicó. Se probaron diversos índices para la discriminación del área quemada que incluyeron: NDVI, BAI, NBR y un

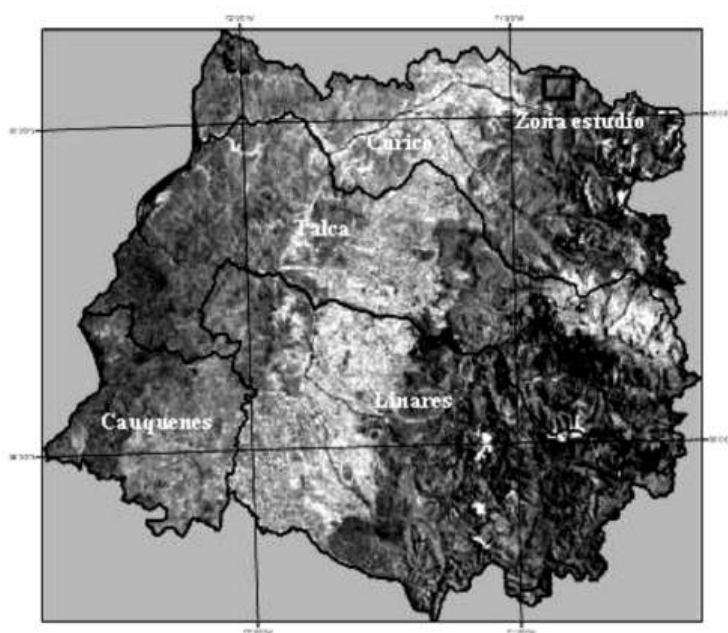
algoritmo de crecimiento de regiones, cuyos resultados fueron contrastados con el área del incendio proporcionado por la Corporación Nacional Forestal CONAF.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área seleccionada para la investigación se encuentra en la zona de alta cordillera de la Comuna de Teno, en el sector La Candelaria (1.724 m.s.n.m.), ubicado a 23 km al norte de la localidad Los Queñes en la Provincia de Curicó, Región del Maule, Chile (Figura 1). La zona posee un clima templado-cálido con abundantes precipitaciones (1.300 mm/año), con sólo 10 días secos por período, las temperaturas fluctúan entre 6.4° C y 21.4° C con una media anual

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Las provincias de la Región del Maule están superpuestas



de 13.8° C. (Ulriksen et al., 1979). La vegetación principalmente está compuesta por bosques de *Nothofagus obliqua*, que dominan sobre los otros tipos de bosques. En altitudes más bajas el bosque dominante se mezcla con la vegetación higrófila de quebradas, llegando a formar un ecotono con el tipo esclerófilo. En sectores más elevados los bosques se asocian con *N. alpina* y *N. glauca* en exposiciones sur, mientras que *N. dombeyi* se circunscribe a quebradas y cursos de agua. Finalmente, en sectores más planos y de exposiciones norte, el bosque de roble suele encontrarse asociado con *Austrocedrus chilensis* (DONOSO, 1995). Los suelos corresponden a la serie Asociación Sierra de Bellavista, que posee una textura moderadamente gruesa y una profundidad inferior a los 25cm, con fuertes limitaciones de pedregosidad y pendientes. Lo anterior, los encasilla en la categoría de suelos con capacidad de uso VIII, reservados sólo para el desarrollo de vida silvestre, recreación o protección de hoyas hidrográficas (CIREN, 1997).

El incendio ubicado en las coordenadas 34.54° latitud sur y 70.50° longitud oeste, se inició el día 25 de Mayo del año 2007 y se extinguió 5 días después de iniciado. Debido a las condiciones de peligrosidad y a la abrupta topografía del terreno, el combate fue efectuado por profesionales de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), empleando 3 brigadas terrestres, dos aviones PZL M18B Dromader cisterna, un helicóptero Lama con Bambi Bucket, un jefe de incendio y tres técnicos. Las superficies afectadas fueron estimadas en 610 ha para arbolado natural, 200 ha para

matorrales y 20 ha para pastizales, las que en conjunto totalizaron un área de 830 ha.

Procesamiento de las imágenes

Para la realización del estudio se dispuso de dos imágenes. La primera de ellas anterior al incendio fue capturada por el sensor ETM+ del satélite Landsat, en Diciembre de 1999; la segunda imagen posterior al incendio, fue tomada en Noviembre de 2007 por el sensor ASTER del satélite TERRA. Ambas imágenes usadas en el estudio, ya contaban con cierto nivel de procesamiento, L1G (http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html) para el caso de las bandas (B3, B4, B5 y B7) ETM+ y L1B (http://lpdaac.usgs.gov/aster/ast_11b.asp) para las bandas (B2, B3, B4, B5) de la imagen ASTER. Con el fin de ajustar las imágenes al sistema de coordenadas (UTM 1909, Psad56 zona 19S) usualmente manejado en Chile, se utilizó un método de corrección geométrica sustentado en puntos de control obtenidos de cartografía vectorial. Se seleccionaron 30 puntos de control para cada imagen, 6 de los cuales fueron empleados como puntos para la verificación de la corrección. Por tratarse de una zona montañosa con altas diferencias de elevación, se optó por la utilización de un polinomio de segundo grado (Chuvieco, 2002). La función de transformación empleada para transferir los niveles digitales, fue la del vecino más próximo, efectuando un remuestreo de 30m para cada imagen. Finalmente una subescena de 288 columnas x 333 líneas fue extraída enmarcando la zona del incendio estudiado.

Los niveles digitales (ND) de ambas imágenes fueron transformados a valores de radiancia con el objeto de minimizar distorsiones relativas al sensor. Para ello, fueron empleados los coeficientes de calibración y conversión proporcionados en los archivos de cabecera de las escenas. Se usó la ecuación (1) propuesta por Markhan y Barker (1986) para transformar los ND en radiancia para el caso de la imagen ETM+ y la ecuación (2) indicada por Abrams et al. (1999) para el caso de la imagen ASTER.

$$L\lambda = LMIN\lambda + \left(\frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{QCALMAX} \right) * QCAL \quad (1)$$

donde:

$L\lambda$ = radiancia espectral
 $QCAL$ = radiancia escalada en unidades de ND
 $LMIN\lambda$ = radiancia espectral cuando $QCAL = 0$
 $LMAX\lambda$ = radiancia espectral cuando $QCAL = QCALMAX$
 $QCALMAX$ = rango más alto de radiancia reescalada en ND

$$L\lambda = (ND-1) * \text{Unit Conversion Coefficient} \quad (2)$$

donde:

$L\lambda$ = radiancia espectral
 ND = radiancia escalada en unidades de ND
 Unit conversion coefficient = coeficientes de conversión

La transformación de la radiancia espectral en el sensor a valores de reflectancia en el techo de la atmósfera, fue realizada utilizando la ecuación (3) propuesta por Markhan y Barker (1986) y los datos de irradiancia publicados por Thome et al. (2001). El método del objeto oscuro de Chávez (1996), fue usado para la corrección atmosférica de las imágenes, descontando los valores mínimos de radiancia a cada banda.

$$\hat{\rho} = \left(\frac{\pi * L\lambda * d^2}{ESUN\lambda * \text{Cos}\Theta_s} \right) \quad (3)$$

donde:

$\rho\lambda$ = reflectancia planetaria
 π = 3.1415927
 $L\lambda$ = radiancia espectral en la apertura del sensor
 $ESUN\lambda$ = irradiancia exatmosférica solar media de cada banda
 Θ_s = ángulo solar cenital
 d = distancia tierra-sol en unidades astronómicas

El valor d , puede ser calculado a través de la siguiente ecuación (4) (Eva y Lambin, 1998)

$$d = (1 - 0.01672 * \text{Cos}(0.9856 * (\text{día juliano} - 4))) \quad (4)$$

Con el objeto de aprovechar las potencialidades brindadas por el enfoque multitemporal y el empleo de imágenes de diferencia para el estudio de incendios forestales (MILLER y YOOL, 2002), se realizó un remuestreo

espectral de la imagen ASTER usando los valores del centro y ancho de cada banda para compatibilizar y transformar la información a un rango espectral homogéneo al que poseen los datos proporcionados por la imagen ETM+, posibilitando el uso de imágenes de diferencias para los índices calculados.

Cálculo de los índices espectrales y de vegetación

Para el cálculo de la superficie quemada se probaron diversos índices espectrales y de vegetación, los que han sido ampliamente usados, valiéndose de los notorios cambios espectrales que causa el fuego en las coberturas forestales afectadas (GARCÍA y CHUVIECO, 2004). Se probó (5) el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), propuesto por Rouse et al. (1974), que muestra un severo decrecimiento después de un incendio, causado básicamente por un deterioro y destrucción de los pigmentos y estructura de la hoja.

$$NDVI = \frac{(\rho_{IRC} - \rho_R)}{(\rho_{IRC} + \rho_R)} \quad (5)$$

donde:

ρ_{IRC} = Reflectancia en el infrarrojo cercano

ρ_R = Reflectancia en el rojo

Otro índice probado (6) fue el Burned Area Index (BAI), definido por Martín (1998) y específicamente formulado para la discriminación de área quemada por sobre otras cubiertas. Su funcionamiento se basa en el cálculo

de distancias espectrales de cada píxel a un valor de convergencia que suelen presentar las áreas quemadas.

$$BAI = \frac{1}{(\rho_R - \rho_{cR})^2 + (\rho_{cIRC} - \rho_{IRC})^2} \quad (6)$$

donde:

ρ_{IRC} = reflectancia en el infrarrojo cercano

ρ_R = reflectancia en el rojo

ρ_{cR} y ρ_{cIRC} = valores de convergencia que adoptan los píxeles quemados sobre las bandas del rojo e infrarrojo cercano. Se definen como 0.1 y 0.06 respectivamente (Martín, 1998).

Se probó (7) además el Normalized Burnt Ratio (NBR), que puede ser considerado como una modificación del NDVI, empleando las bandas del infrarrojo cercano (B4) y la banda (B7) del infrarrojo medio (MIR) de ETM+ y las bandas B3 y B5 en el caso de ASTER. El índice definido por Key y Benson (1999), proporcionó la mejor representación del área quemada y severidad del fuego a través de una primera aproximación visual de los resultados.

$$NBR = \frac{(\rho_{IRC} - \rho_{IRM})}{(\rho_{IRC} + \rho_{IRM})} \quad (7)$$

donde:

ρ_{IRM} = reflectancia en el infrarrojo medio

ρ_{IRC} = reflectancia en el infrarrojo cercano

Segmentación de las imágenes

Para la segmentación de las imágenes resultantes de cada índice se empleó una media de cien puntos muestrales al interior de la zona quemada y un número similar en las zonas consideradas como no quemadas (bosque nativo, estepa, matorral, renoval, roca), sus valores fueron registrados y se calcularon las estadísticas básicas de media y desviación estándar, que se emplearon para confeccionar los umbrales usados en la segmentación de las imágenes en dos clases: quemado y no quemado.

Método del crecimiento de regiones

Un método multipaso basado en el crecimiento de regiones fue usado para mejorar la precisión de las estimaciones de área quemada entregadas por los índices espectrales y de vegetación. En una primera fase se persiguió discriminar en forma muy clara aquellas zonas que se encontraban quemadas, para extraer de estas los píxeles semilla y además buscar la mejor separabilidad espectral de bandas entre la cubierta de quemado y las otras cubiertas de la imagen consideradas como no quemadas. La segunda fase empleó los píxeles colectados anteriormente como semillas para el algoritmo de crecimiento de regiones, que permitió cartografiar la zona del incendio (GARCÍA y CHUVIECO, 2004). En la primera fase, las cubiertas no quemadas que se consideraron en el análisis de separabilidad incluyeron: bosque nativo, estepa, matorral, renoval y roca. La cubierta del Catastro del Bosque Nativo (CONAF) fue empleada para distribuir una media de cincuenta puntos muestrales usados en el cálculo de la separabilidad espectral. El índice

propuesto por Swain y Davis (1978) se usó (8) como una medida estadística simple para evaluar la separabilidad.

$$M = | \mu_u - \mu_b | / (\sigma_u - \sigma_b) \quad (8)$$

donde:

μ_u = es el valor medio de las áreas no quemadas

μ_b = es el valor medio de las áreas quemadas

σ_u = es la desviación estándar de las áreas no quemadas

σ_b = es la desviación estándar de las áreas quemadas

Para el índice M, los valores más altos indicarán una mayor separabilidad entre las cubiertas consideradas. En términos generales un $M > 1$ indica una buena separación entre las categorías quemado y no quemado; por otra parte, un valor de $M < 1$ indica una pobre separabilidad espectral. El cálculo de M fue llevado a cabo para una imagen multitemporal de diferencias simples entre las dos fechas consideradas, con el objeto de minimizar las posibles confusiones espectrales con otras cubiertas que presentan una tendencia estacional (PEREIRA et al., 1999).

Sin embargo, lo anterior se debe tomar con cautela y no debe ser considerado como una dirección absoluta para la discriminación, ya que M es un valor medio, resultante de la medición de muchas cubiertas y su valor puede esconder problemas específicos de discriminación. Por esta razón, Koutsias y Karteris (2000) recomiendan cuando

sea posible, la utilización de datos en la región del SWIR para aminorar estos problemas. Para la selección de las zonas quemadas y la posterior extracción de los píxeles semillas, se emplearon umbrales combinados de los índices espectrales (NDVI, BAI, NBR) asegurándose de aislar y ubicar aquellos píxeles que se encontraban más afectados por el incendio.

En una segunda instancia, los píxeles más afectados por el incendio fueron usados como semillas en un algoritmo de crecimiento de regiones. Estos algoritmos apoyan su funcionamiento en las relaciones contextuales encontradas en la vecindad de los píxeles marcados como semillas (ADAMS y BISCHOF, 1994). De esta forma, la inclusión de píxeles vecinos dentro de una región definida por una semilla se basa en una distancia espacial y espectral, que sigue un criterio de homogeneidad (GARCÍA y CHUVIECO, 2004). Para el crecimiento de las regiones se utilizó, el paquete de procesamiento de PCI Geomatics que contiene una utilidad para tales fines. Los parámetros de entrada para el algoritmo incluyeron el empleo de la banda de diferencias del NBR escalada como imagen de crecimiento, un valor de 5 como tolerancia para el ingreso de un nuevo píxel vecino a la región quemada y se consideró una conectividad de 4 píxeles en la posición en la cual se encontraba la semilla.

Resultados y Discusiones

Determinación del perímetro del incendio

Aunque la superficie y perímetro preliminar fueron aportados por CONAF

Región del Maule, se prefirió en conjunto con personal de la corporación que sobrevoló el incendio, hacer una delimitación de la zona afectada sobre la imagen de diferencias del NBR, ya que las mediciones preliminares fueron realizadas empleando un equipo GPS adosado al helicóptero, lo cual podría presentar inconvenientes en la fiabilidad de la medición de superficie.

Índices espectrales y de vegetación

La figura 2, muestra el índice NDVI calculado para la imagen ASTER post-incendio y la segmentación de la misma en dos categorías quemado y no quemado. Un valor medio de 0.20 y una desviación 0.0027 fueron arrojados por una muestra de cien puntos colectados al interior del incendio. En un principio se optó por emplear un intervalo comprendido por la media más una desviación estándar, no obstante, se encontró una gran cantidad de puntos de confusión con otras cubiertas, particularmente en el rango superior del umbral, razón por la cual, el umbral que finalmente se empleó fue aquel comprendido por el segmento inferior de la media para los puntos muestreados. A pesar de este ajuste, aún en la figura 2 es posible observar confusiones del índice con otras cubiertas, especialmente matorrales y pastizales afectados por el sombreado topográfico del terreno. La tabla 1, muestra que la fiabilidad global de la clasificación con este índice llega a un 92%. Aunque es un valor elevado, se debe casi exclusivamente a la concordancia espacial y temática de los píxeles no quemados, enmascarando problemas con la clase que realmente interesa medir. En

Figura 2. Izquierda, NDVI calculado para imagen ASTER. Derecha segmentación del índice

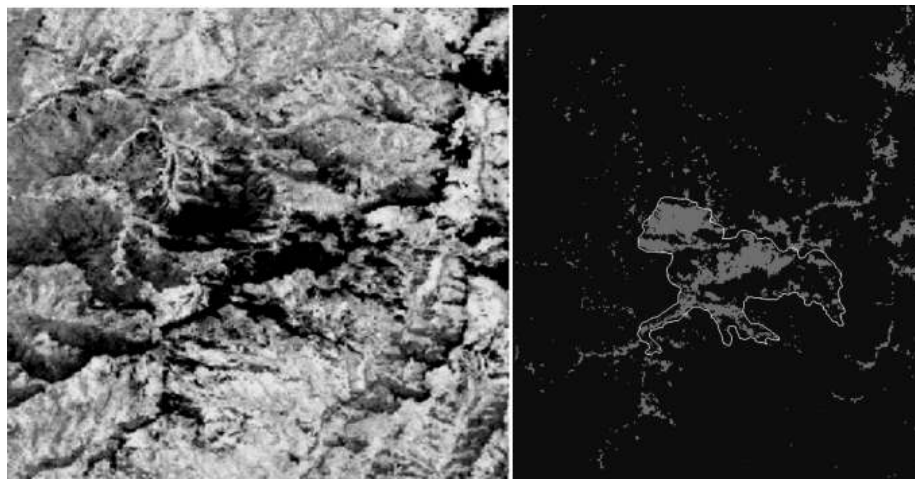


Tabla 1. Método de segmentación y fiabilidad de los resultados

Método Segmentación	Fiabilidad Global (%)	Error Omisión (%)	Error Comisión (%)	Kappa
Diferencias NDVI	92	59	51	40.7
Diferencias BAI	90	70	67	26.2
Diferencias NBR	94	51	44	53.7
Crecimiento de regiones	97	21	14	80.6

este contexto, la tabla 2 muestra estos problemas reflejados en un elevado error de comisión (51%), indicando la proporción entre la superficie bien identificada y el total de la detectada como quemada por la segmentación del índice. Por otra parte se muestra también un alto error de omisión (59%), entendido como la proporción entre la superficie bien identificada por la segmentación y el total realmente quemado (CONGALTON y GREEN, 1994). Asimismo, el valor del índice Kappa (40,7%), que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar (CHUVIECO, 2002) es bastante bajo en esta segmentación.

En el caso del BAI, el índice no logró caracterizar de forma adecuada la zona del incendio. Incluso fue muy difícil tener una primera aproximación visual de la zona afectada. La umbralización de la imagen BAI presentó muchas confusiones especialmente con aquellas zonas de vegetación en laderas sombrías y con píxeles borde en la frontera tierra y cursos de agua. Las confusiones se tradujeron en elevados errores de comisión (67%), además aquellas zonas que presentaron cierta regeneración influyeron en la obtención de altos errores de omisión (70%). Finalmente el valor Kappa para esta clasificación fue bastante bajo (26.2%), por lo que

la utilización del índice fue descartada como una posibilidad de cartografiar el incendio estudiado.

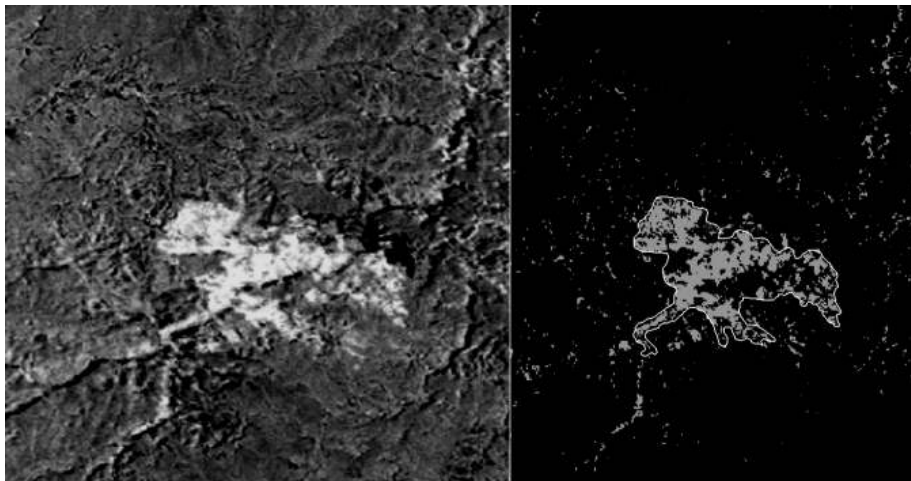
La segmentación de la imagen NBR de diferencias y cartografía del incendio fue llevada a cabo empleando un umbral simple definido por la media (0.65) más una desviación (0.15) obtenida de un muestreo de cien puntos definidos al interior del incendio. En este contexto, la utilización de la imagen NBR de diferencias (Figura 3), entregó mejores resultados que los dos índices probados anteriormente.

superficial que pudo haber ocurrido en las zonas con menor severidad. Las confusiones de la segmentación pueden atribuirse esencialmente a zonas de poca vegetación expuestas en laderas o zonas afectadas por sombras debido al elevado contraste topográfico del relieve imperante.

Separabilidad espectral y método del crecimiento de regiones

La tabla 2 muestra los valores del índice (M). Según el indicador, las bandas que presentaron una mejor

Figura 3. Izquierda, NBR de diferencias. Derecha segmentación del índice



La tabla 1, muestra como este índice logró elevados valores de fiabilidad global (94%), además los errores de omisión (54%) y comisión (44%) son más bajos que las pruebas realizadas anteriormente. Sin embargo, el valor de Kappa, sólo alcanzó el 53.7%. Lo anterior se traduce en que dicha segmentación sólo identificó aquellas zonas del incendio que presentaron un daño más profundo y persistente en la superficie, dejando de detectar el daño

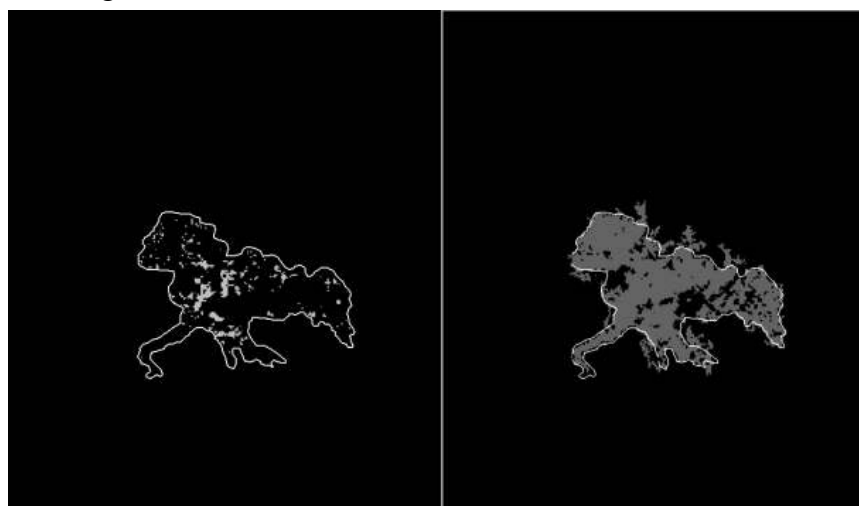
separabilidad en la imagen de diferencias fueron la banda del NBR y el NDVI. Con lo anterior fue posible considerar que la banda más adecuada para el crecimiento de las regiones correspondió a la banda del NBR, que alcanzó un valor $M=6.0040$.

La figura 4 muestra el resultado de la segmentación después de la aplicación del algoritmo de crecimiento, es posible observar que aún existen sectores que no se ajustan del todo al

Tabla 2. Valores de separabilidad (M) para imagen multitemporal de diferencia simple

CUBIERTA	ROJO	NIR	SWIR	MIR	BAI	NDVI	NBR
Bosque nativo	0.7841	3.4725	1.0917	2.0768	2.7640	4.3683	6.3489
Estepa	0.2047	2.8155	1.1963	2.2610	2.2213	3.8973	6.2037
Matorral	0.8665	2.9715	1.6169	3.2975	3.5823	4.2066	4.2431
Renoval	0.6409	2.4372	1.1827	2.8936	2.7341	3.8828	6.6980
Roca	1.2731	2.1621	1.2978	2.9148	1.3643	3.5960	6.5104
Valor medio	0.7534	2.7714	1.2764	2.6882	2.5337	3.7898	6.0040

Figura 4. Izquierda, pixeles semillas. Derecha resultado del algoritmo de crecimiento de regiones



perímetro de verificación del incendio. Lo anterior puede ser consecuencia de la variabilidad espectral de las señales que se encontraban al interior del incendio, generalmente asociada a los tipos de especies afectadas (pastizal de altura, bosque nativo y matorral), al grado de severidad y a la longitud del intervalo de tiempo entre la extinción y la adquisición de la imagen (PEREIRA et al, 1999). Los efectos descritos, pudieron minimizarse empleando una metodología bifásica, donde los perturbaciones producidas por los variados grados de severidad pueden ser removidas, ya que sólo los

pixeles totalmente quemados fueron identificados en la primera fase (reducción del error de comisión), mientras que en la segunda fase se aspiró a clasificar los niveles bajos de severidad (reducción del error de omisión) dentro de las áreas ya consideradas quemadas (Bastarrika, 2005). A la luz de lo anterior, el método del crecimiento de regiones entregó los mejores resultados con respecto a las segmentaciones de los índices probados anteriormente. La tabla 1, muestra que el algoritmo alcanzó un 97% de fiabilidad global, entregando bajos errores de omisión (21%) y comisión

(14%), que se relacionan con alto valor del índice Kappa (80.6%) representando la adecuada concordancia temática y posicional entre la segmentación y los píxeles de referencia.

Por otra parte, si se considera el polígono delimitado por CONAF como realidad de la superficie afectada, la tabla 3, indica que la segmentación del NDVI, subestima en un 59% la superficie real del incendio. Esto tiene su origen en el elevado error de omisión presentado por este índice, evidenciando que se dejaron de clasificar en la categoría quemados una gran cantidad de píxeles de referencia. Con respecto al índice BAI, los resultados de la tabla 3 muestran que los umbrales fueron aún más restrictivos, alcanzando una subestimación del 70% del área quemada. Por su parte, los resultados obtenidos con la imagen de diferencias del NBR, mostraron mejores resultados que los anteriores, subestimando en aproximadamente 51% la superficie del área quemada de referencia. Finalmente, el método que obtuvo un mejor acercamiento a la superficie de referencia fue el de crecimiento de regiones, con una subestimación del 21% con respecto a la superficie calculada por CONAF. Lo anterior puede tener su explicación en parte a la presencia de píxeles borde en la frontera de quemado

– no quemado y al hecho de que el perímetro proporcionado no toma en cuenta los parches de vegetación no quemada que se pudieran encontrar al interior de la zona afectada, asimismo, es importante considerar que las diferencias encontradas entre los métodos probados y la superficie de referencia se pueden atribuir a la permanencia de la señal del material carbonizado por el incendio, factor que depende del lapso de tiempo que transcurre desde el suceso hasta que el sensor toma la imagen, en este caso 7 meses después y a las condiciones meteorológicas y climáticas imperantes en la zona de alta cordillera. El viento, la lluvia y la regeneración de nuevas especies pueden disminuir y enmascarar la señal del material carbonizado, aumentando aún más las diferencias.

Conclusiones

Las imágenes obtenidas del sensor ASTER pueden ser consideradas como alternativas adecuadas para el estudio y la cartografía de áreas quemadas, gracias a su elevada resolución espacial y la abundante información que proporcionan en la zona del SWIR, que permite eliminar gran parte de las confusiones que se producen entre la zona quemada y otras cubiertas como sombras de nubes y cuerpos de

Tabla 3. Superficies estimadas según cada método

Método de estimación	Superficie afectada (ha)	Diferencia absoluta (ha)	Diferencia relativa (%)
CONAF	658.44		
Diferencias NDVI	272.25	386.19	-59
Diferencias BAI	196.65	461.79	-70
Diferencias NBR	324.9	333.54	-51
Crecimiento de regiones	517.14	141.3	-21

agua. Asimismo, quedó en evidencia que optar por aquellos índices que incorporen información en la zona del IRC/SWIR, entregan mejores resultados que los que emplean el tradicional espacio VIS/IRC, esto porque la primera región ha demostrado ser más efectiva al presentar un mayor reflectancia sobre la superficie quemada y porque presenta una reducción en la dispersión atmosférica (Pereira et al., 1999; Csiszar, et al., 2004). Entre los índices espectrales empleados, el NBR mostró su alta potencialidad para discriminar superficies afectadas por incendios forestales frente a otras cubiertas que no presentan daños (Key y Benson, 1999; Miller y Yool, 2002). A la luz de los resultados la técnica que mostró los mejores resultados fue la de crecimiento de regiones, presentando una adecuada delimitación del área quemada y una aproximación a la superficie de la misma. Los errores de omisión se pueden atribuir a la elección de semillas con valores muy elevados, la presencia de píxeles mixtos en el borde del perímetro y a la gran diferencia temporal existente entre

la fecha de ocurrencia del incendio y la fecha de adquisición de la imagen (7 meses aprox.), permitiendo una posible regeneración de zonas que no fueron afectadas severamente por el fuego. Los métodos multipaso ofrecen ventajas por sobre las técnicas de umbralización simple y múltiple, ya que a través de su enfoque metodológico bi-fase permiten cartografiar casi en forma exclusiva solo los píxeles realmente quemados (Bastarrika, 2005; García y Chuvieco, 2004), evitando de esta manera errores de comisión que pueden llevar a una mala interpretación y uso de la información generada. Finalmente, en casos de incendios de difícil acceso se hace evidente la utilidad de los datos proporcionados por sensores satelitales para la estimación de superficies quemadas, pues entregan buenas aproximaciones a las superficies afectadas, aportando con datos de calidad para un adecuado registro estadístico de las temporadas y posibilitando el análisis de la evolución de las superficies quemadas, la planificación y medición de la efectividad de los programas de prevención a través del tiempo.

Referencias

- ABRAMS, M. HOOK, S. RAMACHANDRAN, B. (1999). Aster user handbook, version 2. NASA/Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA. 135 pp.
- ADAMS, R. BISCHOF. L. (1994). Seeded region growing. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. Vol 16. N 6. 641-647 pp.
- BASTARRIKA, A. (2005). Métodos semiautomáticos de cartografía de área quemada mediante crecimiento de regiones. Tesina de suficiencia investigativa. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá de Henares. España. 88 pp.
- CIREN. (1997). Estudio Agrológico VII Región. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago, Chile. 659 pp.

- CONGALTON, R. GREEN K. (1998). Assessing the accuracy of remote sensed data: Principles and practices. New York. Lewis Publishers. 137 pp.
- CSISZAR, I. LOBODA, T. FRENCH, N. GIGLIOC, L. HOCKENBERRY, T. (2004). A multi-sensor approach to fine-scale fire characterization. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. Global monitoring for sustainability and security. Disasters and Hazard <<http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/598.pdf>>
- DONOSO, C. (1995). Bosques templados de Chile y Argentina. Ed. Universitaria. Santiago. Chile. Tercera edición. 483 pp.
- DI BELLA, C. JOBBÁGY, E. PARUELO, J. PINNOCK, S. (2006). Continental fire density patterns in South America. *Global ecology and biogeography*, 15: 192-199.
- EVA, H. Y LAMBIN, E.F. (1998). Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 18, 3473-3497.
- CHÁVEZ, JR, P.S (1996). Imagen-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- CHUVIECO, E. (2002). Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Madrid, Ariel Ciencia Editores, Barcelona, España. 586 pp.
- CHUVIECO, E., MARTÍN, P. PALACIOS, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discriminations. *Int. J. Remote Sensing* 23(23): 5103-5110.
- FAO (2007). Situación de los bosques del mundo. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.
- GARCÍA, M Y E. CHUVIECO. (2004). Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. *Remote Sensing of Environment* 92: 414-423.
- HATTENHOFF, H. (1998). Impacto del fuego sobre el medio ambiente. Corporación Nacional Forestal, Santiago, Chile. 98 pp.
- KEY, C. BENSON, N. (1999). The normalized burnt ratio, a Landsat TM (Thematic Mapper) radiometric index of burn severity incorporating multitemporal differencing <<http://nrmisc.usgs.gov/research/nbr.htm>>
- KOUTSIAS, N Y KARTERIS, M (2000). Burned area mapping using logistic regression modeling of a single post-fire Landsat-5 Thematic Mapper image, *International Journal of Remote Sensing*, 21(4), 673-687.
- MARKHAN, B. Y BARKER, J. (1986). Landsat MSS and TM post-calibration dynamics range, exoatmospheric reflectance and at-satellite temperature. EOSAT. Landsat Technical Notes 3-8.
- MARTÍN, M.P. (1998). Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Departamento de Geografía. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá. España.

MILLER, J. YOOL, S. (2002). Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment*. 82. 481-496 pp.

PEREIRA, J.M.C., A.C.L. SÁ, A.M.O. SOUSA, J.M.N. SILVIA, T.N. SANTOS, J.M.B. CARREIRAS. (1999). Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. E. Chuvieco. Berlin, Springer-Verlag: 123-138.

ROUSE, J. W. HAAS, R. DEERING, D. SCHELL, J. HARLAN, J. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report (Greenbelt, MD: NASA).

SWAIN, P. H., DAVIS, S. M. (1978). *Remote sensing: The quantitative approach*. New York: McGraw-Hill, Capítulo 3.

THOME, K. S, BIGGAR, P. SLATER. (2001). Effects of assumed solar spectral irradiance on intercomparisons of earth-observing sensors. En: Fujisada H, J Lurie, Weber K(eds). *Sensors, systems and next-generation satellites: Proceedings SPIE*. Vol 4540. 260-269 pp.

ULRIKSEN, P. PARADA, M., ACEITUNO, P. (1979). *Climatología*. Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (IREN-CORFO). Santiago. Chile. 115 pp.