

VALIDACIÓN PARA COLOMBIA DE LA ESTIMACIÓN DE ÁREA QUEMADA DEL PRODUCTO L3JRC EN EL PERIODO 2001-2007

VALIDATION OF THE L3JRC BURNED AREA PRODUCT ESTIMATION IN COLOMBIA FROM 2001 TO 2007

Jesús A. Anaya-Acevedo^{1,3}, Emilio Chuvieco-Salineró^{2,4}

Resumen

Este documento presenta la validación del producto global de área quemada L3JRC en Colombia utilizando el método de matrices de confusión e imágenes de satélite Landsat como sustituto a la verdad terreno. El producto L3JRC, generado por Tansey et al. en el año 2007, es un mapa de áreas quemadas obtenido por teledetección con datos del instrumento SPOT-VEGETATION. La determinación del área quemada generada por los incendios se obtiene por teledetección gracias a la diferencia en reflectividad antes del fuego (vegetación) y después del fuego. La validación del producto demuestra clara tendencia hacia la omisión de áreas quemadas, aunque también con errores importantes por comisión. Sin tener en cuenta el tipo de error, se encontró que el producto L3JRC subestima en 40% la superficie quemada del país. Con las consideraciones en la fiabilidad se concluye que el promedio anual de área quemada en Colombia es de 14.807 km² aunque podría superar los 21.000 km² si se tienen en cuenta los altos valores de omisión y subestimación detectados en la validación. La región de la Orinoquia tiene más del 90% del área total del país, siendo los departamentos colombianos con mayor área quemada Vichada, Meta, Arauca y Casanare.

Palabras clave: área quemada, Colombia, gases efecto invernadero, quema de biomasa, teledetección

Abstract

This document presents a validation of the global burned area product (L3JRC) in Colombia, using the method of the confusion matrix where Landsat images are used as a proxy for fieldwork. The product L3JRC is a burned area map based on remote sensing SPOT-VEGETATION data and generated by Tansey et al. in 2007. Determination of burned area using satellite data is possible because of the difference in reflectance before and after a fire. A pattern toward larger omission errors was found in the validation process, although commission errors also were present. Disregarding the type of error, it was shown that the product L3JRC underestimates 40% of the burned area of the country. With this accuracy of assessment, it was concluded that the annual average burned area in Colombia during the annual study period was 14,807 km², taking into account omission values burned area may exceed 21.000 km². Orinoquia region has more than (90%), of the total burned area of the country, where Vichada, Meta, Arauca, and Casanare were the most affected Colombian departments.

Key words: biomass burned area, Colombia, greenhouse gas emissions, remote sensing

INTRODUCCIÓN

La quema de vegetación cobra cada vez mayor importancia en el ámbito local y global debido a la producción de gases efecto invernadero,

a la pérdida de biodiversidad, a los daños a la propiedad privada y a la pérdida de vidas humanas (Nepstad et al. 1999). La comunidad internacional ha hecho un gran esfuerzo en generar y poner a disposición de los usuarios,

Recibido: abril 2010; aceptado: junio 2010.

¹ Profesor Asociado. Universidad de Medellín. Carrera 87, # 30-65. Medellín (Antioquia), Colombia.

² Profesor Catedrático. Universidad de Alcalá. Calle Colegios, 2, 28801. Madrid, España.

Correos electrónicos: ³ <janaya@udem.edu.co>; ⁴ <emilio.chuvieco@uah.es>.

mapas asociados a la ocurrencia del fuego obtenidos con técnicas de teledetección, tanto de área quemada como de fuegos activos (Gregoire et al. 2003, Roy et al. 2006, Simon et al. 2004).

En el año 2000 se desarrollaron los dos primeros productos a escala global de área quemada: el GBA 2000 (Tansey et al. 2004) y GLOBSCAR (Simon et al. 2004). El objetivo de estos mapas fue generar información homogénea a escala global con metodología estándar y una resolución espacial de 1.000 m (Hoelzemann et al. 2004). Actualmente, los mapas globales de área quemada obtenidos por teledetección más conocidos son L3JRC (<http://www-tem.jrc.it>) y GlobCarbon (<http://www.geosuccess.net>), los cuales son versiones mejoradas de GBA2000 y GlobScar respectivamente, y el MCD45, obtenido a partir de datos MODIS y con resolución espacial de 500 m. En el ámbito latinoamericano existen dos mapas de interés, uno elaborado por Chuvieco et al. (2008), basado en imágenes MODIS-Terra, y otro elaborado por Opazo y Chuvieco (2007), denominado AQS y realizado a partir de imágenes MODIS-Terra y MODIS-Aqua con reflectividad corregida.

Otro producto de cobertura global es el *Global Burned Area*, GBA2000, promovido por el *Joint Research Center (JRC)* a partir de datos SPOT/VEGETATION (<http://www.gvm.jrc.it/fire/gba2000/index.htm>). Aquí, en lugar de utilizar algoritmos de carácter global, se promovió una red que permitiera elaborar algoritmos regionales específicos para cada ecosistema y tipo de vegetación. En total se generaron siete algoritmos para procesar todo el año 2000, haciendo énfasis en la detección multitemporal de cambios (Gregoire et al. 2003, Tansey et al. 2004). A partir de esta experiencia, y con el fin de abarcar un rango de tiempo más largo, se generó un único algoritmo denominado L3JRC que se fundamenta en las diferencias en el canal IRC entre cada nuevo valor observado en reflectividad y su valor previo. Si la disminución en el

IRC supera determinado umbral se asume que es debida al efecto del fuego en la vegetación. Este cálculo genera una nueva matriz denominada “índice I” que consta de valores cero donde no hay diferencias temporales entre los píxeles y mayores de cero donde sí las hay. El criterio para detectar las áreas quemadas no utiliza umbrales fijos, sino que aplica un proceso de convolución donde se generan ventanas de 200 por 200 píxeles en el “índice I” con el fin de calcular la media y la desviación estándar por ventana. De esta forma se define si el píxel está quemado por referencia del contexto (Tansey et al. 2007).

Los algoritmos descritos previamente demuestran la diversidad en las aproximaciones realizadas en la clasificación de área quemada: umbrales temporales, umbrales espaciales, y método en dos fases, lo que lleva a que cada producto tenga fortalezas y debilidades. Por otro lado, existen múltiples causas de error ajenas a los algoritmos de detección de área quemada pero inherentes a la teledetección: resolución espacial, confusión con algunas coberturas no vegetales (suelos oscuros, sombra de nubes, cuerpos de agua), configuración compleja de las áreas quemadas en el paisaje (áreas pequeñas o muy fragmentadas), severidad del incendio, interferencias atmosféricas (nubes y plumas de humo); y la corta permanencia de la señal, si bien este factor depende de los ecosistemas. En zonas tropicales, la rápida regeneración de la vegetación y las lluvias recurrentes hacen que la señal del área quemada sea bastante efímera.

La ocurrencia de incendios en Colombia asociados a la quema de biomasa puede discriminarse utilizando la clasificación en Regiones Naturales realizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi: región de la Llanura del Caribe, región del Pacífico, región Andina, región de la Orinoquia y región de la Amazonia. Esta ocurrencia se acentúa en las dos épocas secas, las cuales se incrementan o atenúan según el comportamiento

del fenómeno del Niño (**ENSO**) descrito por Mesa et al. (1997). La Orinoquia, la llanura del Caribe y los valles interandinos han presentado históricamente alta ocurrencia de fuego. Por el contrario, los bosques amazónicos y la región del Pacífico han presentado baja ocurrencia debido a sus altas precipitaciones. Las causas del fuego en Colombia son principalmente de origen antrópico (Mavdt 2002), relacionado con diversas actividades: descuidos, cacería, prácticas agrícolas y el contacto de las líneas eléctricas con la vegetación (Mavdt 2002). El estudio más riguroso sobre la ocurrencia del fuego en Colombia fue elaborado en los Llanos Orientales (Romero-Ruiz et al. 2010), donde estiman que casi 70% de las sabanas se ha quemado alguna vez entre 2000 y 2008 con el promedio anual entre 22.500 y 32.500 km². La información sobre la extensión y el tipo de vegetación quemada en Colombia es escasa dado que solo se generan inventarios de campo dispersos y con diversos niveles de calidad en cuanto a localización y área afectada. Esta información ha sido catalogada de poco valor para un análisis representativo del total de área quemada en el país (IDEAM 2004).

Por tanto uno de los problemas en Colombia respecto a la ocurrencia del fuego por quema de biomasa se centra en la inexistencia de estadísticos homogéneos y completos del país. Estos estadísticos pueden obtenerse mediante la validación de los productos de carácter global ya existentes. Por tanto, el objetivo principal de esta investigación es determinar la fiabilidad del producto global de área quemada L3JRC en Colombia. Esta validación se fundamenta en matrices de confusión que evalúan pixel a pixel los estimados globales L3JRC con la verdad de campo obtenida a partir de imágenes de satélite Landsat-CBERS. Se hizo énfasis en las regiones Orinoquia y Caribe debido a su alta ocurrencia de fuego. A partir de los resultados de fiabilidad encontrados en la validación se hace una estimación de la extensión geográfica del área quemada del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos de entrada. Se obtuvieron los datos binarios de área quemada L3JRC 2001-2007 (Tansey et al. 2007), el cual fue elaborado por el consorcio de tres universidades: Universidad de Leicester (Reino Unido), Universidad Católica de Louvain (Bélgica) e Instituto de Investigaciones Tropicales (Portugal). **L3JRC** consta de siete mapas anuales, en cada mapa se asume que la temporada de incendios inicia el primero de abril y que una superficie no se quema más de dos veces en una misma temporada. La información original se encuentra en formato ráster con sistema de coordenadas geográficas, datum WGS84 y extensión geográfica entre 180W, 75N y 180E, 35S y fueron proyectados al sistema de coordenadas UTM uso 18N con la extensión geográfica correspondiente al área continental de Colombia. Cada píxel tiene resolución de 1 km y se identifica con el día juliano correspondiente al primer día de detección del fuego.

Métodos de validación. Para determinar la fiabilidad del mapa de área quemada L3JRC se requiere generar un nuevo mapa con información de referencia (verdad de campo), así como de un método que permita comparar ambos mapas. Para generar la información de referencia, o verdad de campo, sería necesario hacer recorridos en campo o recorridos aéreos con sistemas de posicionamiento global (**GPS**), esto con el fin de delimitar el perímetro de la vegetación quemada en cada zona. Este método, sin embargo, es impracticable dada la gran extensión geográfica del país y la imposibilidad de definir el perímetro de la señal quemada donde la regeneración de la vegetación es rápida. Utilizando este procedimiento las evidencias del fuego no podrían ser identificadas. Como sustituto a los recorridos de las áreas quemadas, trabajos previos, han utilizado imágenes de satélite de media-alta resolución en las que se pueda identificar el área quemada con bastante certeza. Este método no solo permite

abarcar grandes extensiones geográficas, sino que además permite acceder a datos de archivo para zonas donde la señal de la vegetación quemada se ha perdido (Boschetti et al. 2006). En este caso las imágenes de satélite, sustituto al trabajo de campo, se denominan “imágenes de referencia”.

La identificación de perímetros quemados utilizando imágenes de satélite Landsat ha sido utilizado como sustituto a la delimitación de los perímetros quemados en campo (figura 1), ya que tienen la resolución espacial y espectral adecuadas para este tipo de análisis (Boschetti et al. 2006, Chuvieco et al. 2008, Roy et al. 2005). Se asume que las áreas quemadas identificadas en las imágenes satelitales de referencia corresponden a la misma temporada de incendios, pues la señal es poco persistente en ecosistemas tropicales. Ahora bien, por esta misma razón, se corre el riesgo de no identificar áreas quemadas de la misma temporada ya que la recuperación de la vegetación es rápida, lo cual resulta en una pérdida de la señal y por tanto en una omisión en los mapas de referencia. La figura 1 corresponde a los Llanos Orientales a lo largo del río Orinoco en la frontera entre Colombia y Venezuela. Cada imagen se reconoce por el nombre del sensor, la fecha y el sistema de referencia. El sistema de referencia se denomina *World Reference System (WRS)* compuesto por columnas (*paths*) y filas (*rows*), un ejemplo de la notación es el siguiente:

Sensor	año	mes	día	<i>path</i>	<i>row</i>
ETM+	2005	12	29	p005	r056

Un método utilizado frecuentemente en la estimación de la fiabilidad de mapas temáticos se fundamenta en la matriz de confusión. Se trata de una matriz cuadrada, que indica el número de píxeles asignados a una clase respecto a los que se consideran como verdad de campo. Se acostumbra ubicar en las columnas la información de referencia (obtenida a partir de imágenes

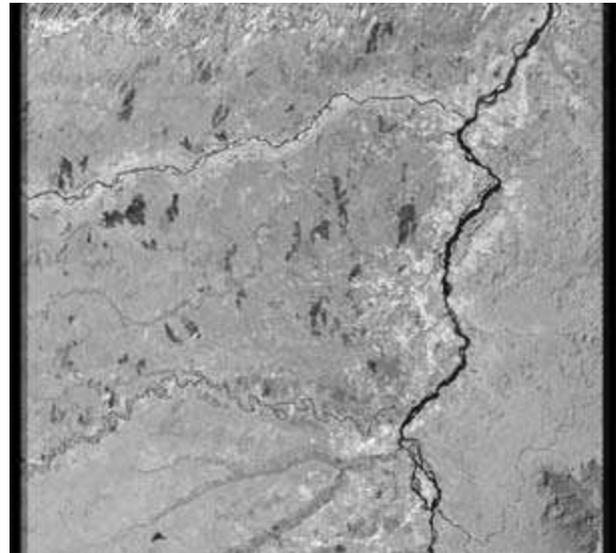


Figura 1. Imagen Landsat (Path 004, Row 056, 9 de enero de 2001) en la confluencia de los ríos Orinoco y Meta en el municipio de Puerto Carreño (Vichada). Nótese las áreas quemadas de tonos más oscuros

Landsat) y en las filas el mapa que se a ser evaluado (L3JRC), de esta forma la diagonal contiene los aciertos y los marginales los errores. La exactitud global es el número de píxeles clasificados correctamente dividido por el número total de píxeles. La matriz de confusión ha sido comúnmente utilizada desde la década de los 80 para la validación de mapas temáticos (Aronoff 1982), incluyendo validaciones de mapas de área quemada (Morisette et al. 2002, Quintano et al. 2002, Roman-Cuesta et al. 2005).

Datos para la validación. Para la obtención de la información de verdad terreno, necesarias para la validación, se interpretaron y clasificaron imágenes de alta resolución de forma dicotómica: quemado y no quemado en distintas partes del país. Se evaluaron todas las alternativas posibles en imágenes de alta resolución y bajo costo, se consideraron imágenes Landsat-TM o ETM+, CBERS, SPOT y ASTER. Brasil cuenta con un banco valioso de imágenes CBERS a las que se puede acceder gratuitamente a través del *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

(INPE, <http://www.inpe.br/>), el satélite CBERS tiene una cámara CCD de 5 bandas espectrales y resolución espacial de 20 m. En Colombia hay cobertura CBERS para toda la Amazonia y buena parte de los Llanos Orientales hasta los límites con la región Andina. Sin embargo, la mayor cantidad de datos de verdad de campo fue obtenida del *Global Land Cover Facility* (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu/>) de la Universidad de Maryland, de los sensores TM y ETM+. La alta nubosidad de la zona de estudio hace que la disponibilidad de imágenes útiles sea bastante limitada. Es prácticamente imposible obtener imágenes con área quemada y a la vez libre de nubes a través de un diseño de muestreo en la zona de estudio, razón por la cual las imágenes utilizadas no provienen de un muestreo estadístico.

En total se consideraron un total de quince imágenes Landsat y cuatro imágenes CBERS para obtener la verdad de campo. De estas diecinueve imágenes se seleccionaron diez que equivalen aproximadamente a un tercio del país (303.700 km²), haciendo énfasis en aquellas fechas (tabla 1) y lugares (figura 2) que presentan mayor cantidad de área quemada. De esta forma, en cada imagen quedan bien representadas tanto las áreas no quemadas (para evaluar comisión) como las áreas quemadas (para evaluar omisión). Aunque si bien imágenes sin área quemada podrían evaluar la comisión, estudios previos han encontrado que la principal fuente de error es la omisión. Se excluyeron imágenes del mismo lugar en de la misma temporada de incendios o con alto contenido de nubes.

Se clasificaron las imágenes Landsat de forma supervisada revisando cuidadosamente posibles confusiones de áreas quemadas (señal del carbón) con sombras de nubes, cuerpos de agua o suelos oscuros. Se utilizaron imágenes con fechas anteriores a la imagen clasificada con el fin de corroborar la ocurrencia del fuego y aclarar posibles confusiones con zonas de reflectividad similar a

la de las áreas quemadas. Las bandas del sensor ETM+ disponibles a partir de 14 de julio de 2003 no pudieron ser clasificadas de forma supervisada debido al fallo radiométrico por descompensación del barrido *Scan Line Corrector (SLC)*. Para su interpretación se generó un compuesto en falso color para cada imagen y se procedió a digitalizar el perímetro de cada una de las áreas quemadas identificadas. Aunque se trata de un trabajo en extremo dispendioso se obtiene información de altísimo valor que de otra forma no sería posible conseguir. En total se utilizaron diez imágenes de satélite de referencia (tabla 1). Se hizo énfasis en la regiones Orinoquia (ocho imágenes equivalentes a 238.900 km²) y Caribe (dos imágenes equivalentes a 64.800 km²) por su gran ocurrencia de incendios asociados a quema de biomasa y se dio prioridad a los meses de enero, febrero y marzo ya que corresponden a la época seca. En la figura 3 se presenta la distribución espacial de 17.343 polígonos con un total de 30.968 km² de área quemada, se excluyen las imágenes del Caribe por su bajo contenido de área quemada. La presión sobre el bosque amazónico y la renovación de pastizales para ganadería hacen que la región de la Orinoquia presente un amplio mosaico de áreas quemadas.

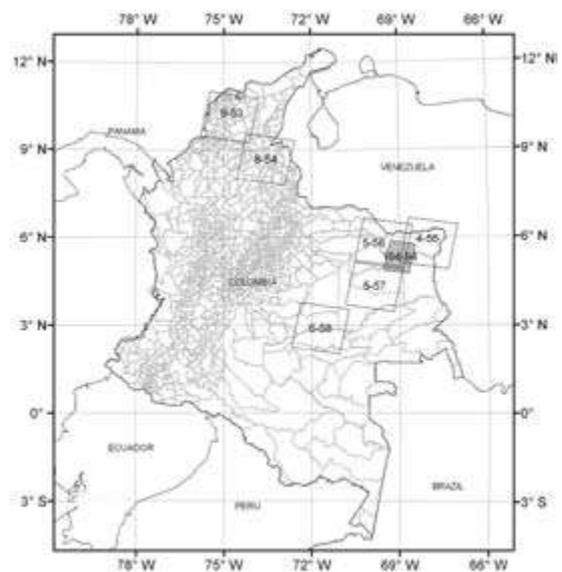


Figura 2. Área de estudio, correspondiente a Colombia al norte de Suramérica, posición de ventanas Landsat y CBERS (resaltada) evaluadas con mayor ocurrencia de incendios

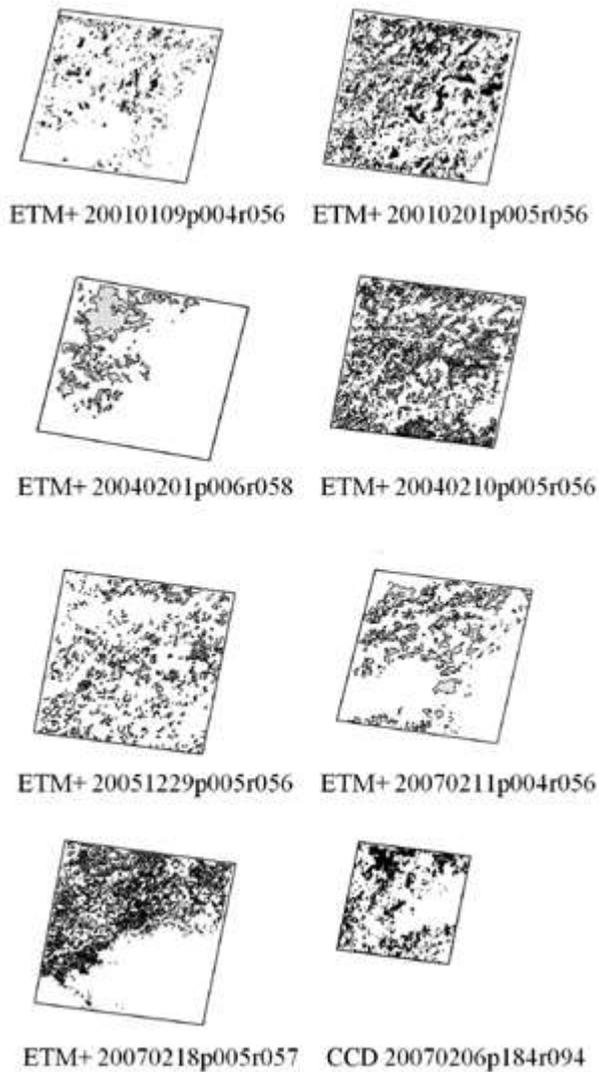


Figura 3. Área quemada obtenida a partir de imágenes de alta resolución, se indica el sensor, la fecha (año/mes/día) y el sitio de cada escena según el sistema WRS de Landsat. Nótese que algunas imágenes son del mismo lugar pero de años distintos

RESULTADOS

Validación. En general, la exactitud global es cercana al 90% debido al acuerdo en la clase no quemada (tabla 2). El valor mínimo es del 71,3%, en una matriz que presenta un error de omisión (**Oe**) particularmente alto. Los errores de omisión han provocado la mayor disminución en la exactitud global (**Eg**) y tienden a ser

mayores (media 65%) que los errores de comisión (**Ec**, media 0,42), lo cual resulta en una subestimación del total del área quemada. Las imágenes con menos contenido de área quemada corresponden a las sabanas de la región Caribe, que con su alta fragmentación arrojaron errores de omisión y comisión cercanos al 100%, sin embargo la exactitud global es próxima a 1 debido a la alta coincidencia entre píxeles clasificados como no quemados.

La tendencia de la subestimación se confirma al comparar el total de área quemada identificada en las imágenes de referencia con el área quemada en L3JRC. De las diez imágenes evaluadas, tres presentan tendencia a la comisión y siete presentan tendencia a la omisión. En las diez imágenes de referencia se identificaron 30.936 km² de área quemada, mientras que L3JRC tan solo clasifica 18.261 km² como área quemada, es decir el 59% del total. Aunque no se hizo un análisis de estadística de fragmentos se observó que en la mayoría de las imágenes el porcentaje de polígonos con área menor a 1 km² es superior a la mitad del total de polígonos. De esta forma, es de esperar que la baja resolución espacial de L3JRC sea una de las razones para los altos valores de omisión.

Estadísticas de área quemada según L3JRC.

El total de área que ha sufrido alguna quema según el producto L3JRC entre enero de 2001 y marzo de 2007 es de 46.431 km² con promedio anual de 14.807 km² quemados. Si se acumulan las áreas que se queman de forma recurrente en los seis años, el total de área quemada es de 103.650 km², donde más de 1.200 km² se han quemado seis o siete veces durante el periodo 2001-2007 (figura 4). Las regiones con mayor extensión de área quemada son la Orinoquia y la Andina. Esta última es especialmente llamativa por la gran cantidad de área quemada con respecto a su área total (tabla 3) y a la concentración de área quemada en el departamento de Santander. Las regiones Caribe y Amazonia tienen

Tabla 1. Número de áreas quemadas y superficie quemada según la interpretación visual de imágenes de satélite Landsat y una imagen CBERS clasificada de forma supervisada (*El área de una imagen Landsat-ETM+ y CBERS-CCD es aproximadamente de 32.400 km², y 12.100 km², respectivamente); [**Aq 1** = área quemada (referencia); **Aq 2** = área quemada (L3JRC)]

Imagen Landsat*	# de polígonos	Aq 1 (km ²)	Aq 2 (km ²)
ETM+20080116p009r053	81	32	N/D
ETM+20070223p008r054	629	103	16
ETM+ 20010109p004r056	2.207	668	1.033
ETM+ 20010201p005r056	5.169	2.560	2.764
ETM+ 20040201p006r058	97	3.647	1.956
ETM+ 20040210p005r056	2.791	8.542	5.009
ETM+ 20051229p005r056	724	3.774	1.538
ETM+ 20070211p004r056	437	4.595	2.496
ETM+ 20070218p005r057	2.647	5.826	1.737
CCD 20070206p184r094	2.561	1.221	1.712

Tabla 2. Errores de omisión y comisión del mapa L3JRC según matrices de confusión. Las fechas identifican las escenas utilizadas como verdad de campo (**Eo** = errores de omisión; **Ec** = errores de comisión; **Eg** = exactitud global; **Fecha** = año-mes-día)

Eo	Ec	Eg (%)	Fecha
68	73,6	96,8	2001-01-09
55,6	47	91,9	2001-02-01
52,5	11,4	95,8	2004-02-01
78,7	63,7	71,3	2004-02-10
70,6	28,1	94,2	2005-12-29
54,5	59,3	88,5	2007-02-06
65,4	30,1	89,9	2007-02-11
77,5	24,5	88,2	2007-02-18

valores similares de área quemada, aunque en términos de área, la Amazonia representa casi la mitad del país. En la región Pacífica no hay detección de área quemada, lo cual se explica

por las altas precipitaciones y la ausencia de épocas secas muy marcadas. Los departamentos de la región de la Orinoquia presentan la mayor superficie quemada (figura 4), albergando más del 90% de área quemada del país en sus cuatro departamentos: Vichada (55%), Meta (22%), Arauca (8%) y Casanare (7%). En la figura 5 se observa su distribución espacial en proporción, es decir (área quemada/área municipio) * 100. El mapa con la división política de Colombia puede obtenerse en el servidor de mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi <http://www.igac.gov.co/igac_web/contenidos/home.jsp>.

La variabilidad interanual de la ocurrencia del fuego reportada por L3JRC es bastante alta (figura 6). El año 2004 tuvo alta ocurrencia de fuego y, por tanto, alto consumo del combustible, lo que provoca baja disponibilidad de combustible para el año siguiente y por tanto baja ocurrencia en 2005. Luego, en 2007, se presenta un nuevo aumento en área quemada asociado al aumento en combustible disponible de los dos años previos. La tendencia en variabilidad

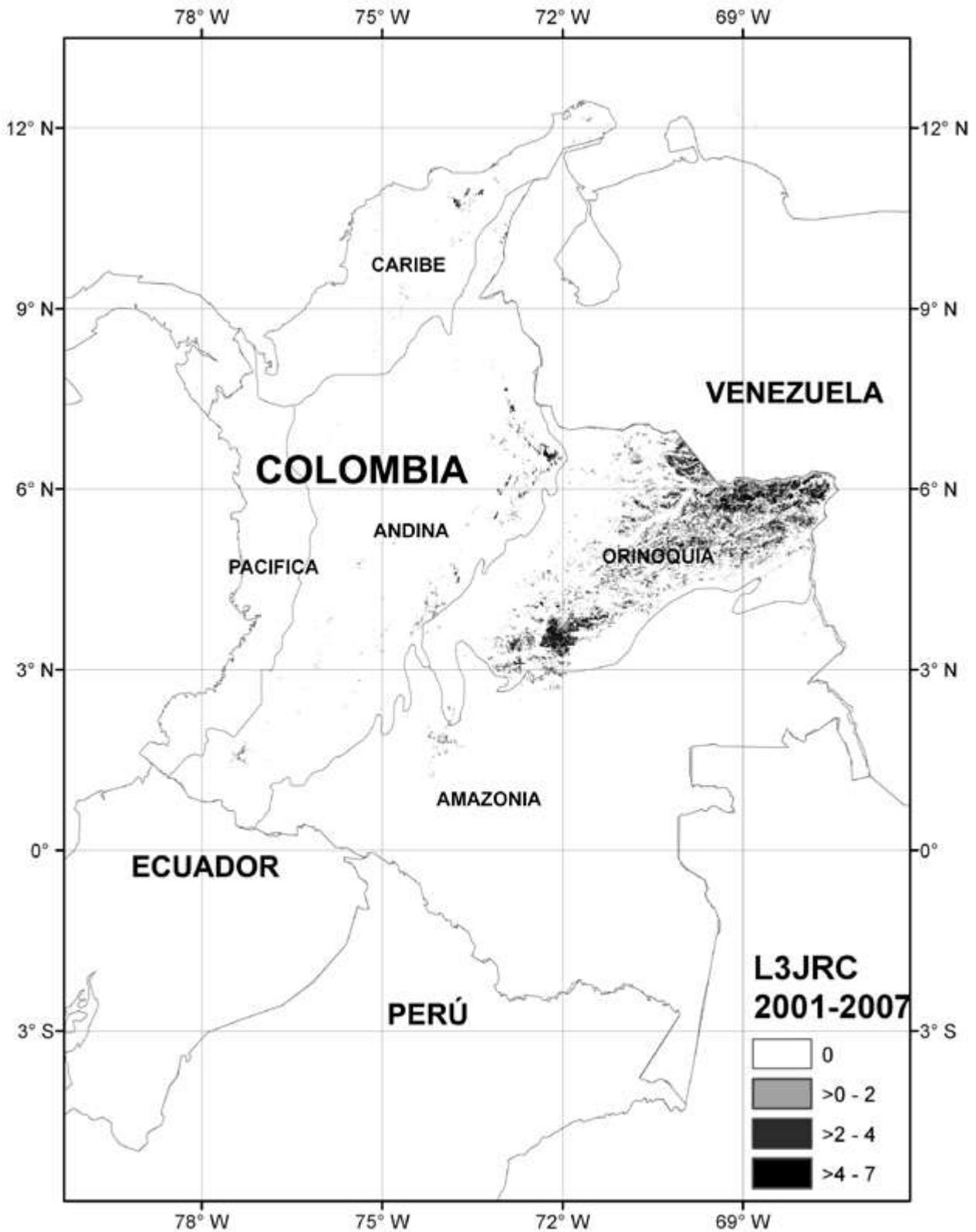


Figura 4. Distribución espacial del área quemada en Colombia a partir de L3JRC. Los tonos más oscuros corresponden a zonas que se quemaron entre cuatro y siete veces durante el periodo 2001-2007

Tabla 3. Distribución de área quemada por regiones según L3JRC (Aq = área quemada; At = área total)

Regiones	Aq (km ²)	At (km ²)	%
Caribe	697	110.031	0,6
Andina	2.953	306.163	1,0
Pacífica	2	80.209	0,0
Orinoquia	42.013	202.629	20,7
Amazonia	766	439.980	0,2

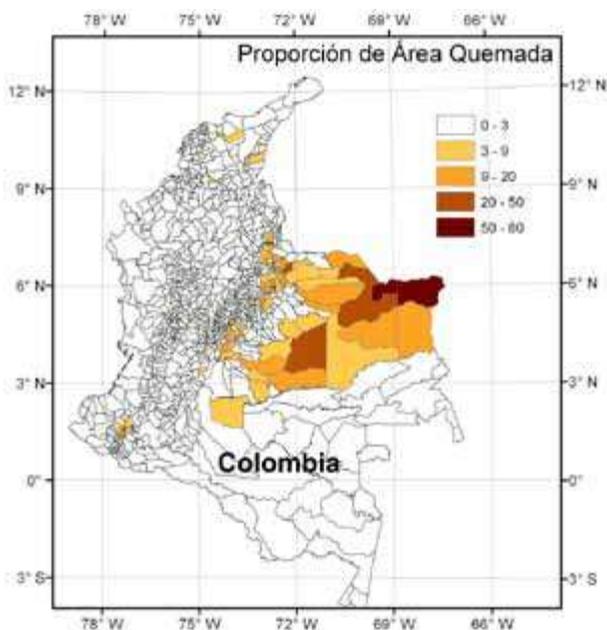


Figura 5. Proporción de área quemada en Colombia por área municipal basado en L3JRC (%) en el periodo 2001-2007

interanual se confirma con datos MODIS del producto de área quemada MCD45V5 aunque este último con valores más bajos del total de área quemada interanual.

Con el fin de determinar el tipo de vegetación quemada, se hizo un análisis a partir del mapa de cobertura del suelo denominado MOD12Q1

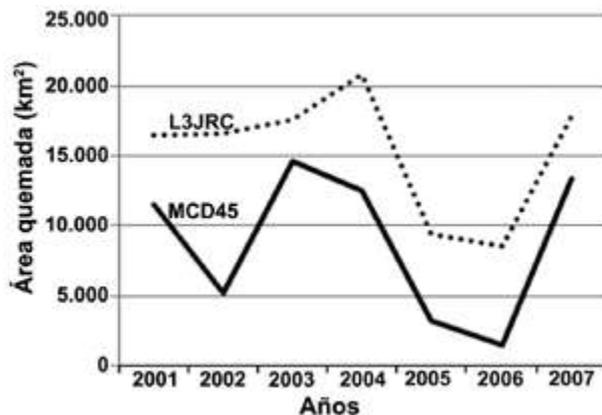


Figura 6. Variación interanual de los productos de área quemada L3JRC y MCD45 para toda Colombia en el periodo 2001-2007

(Friedl et al. 2002). Este es un mapa de diecisiete clases obtenido con técnicas de clasificación en árbol y basado en la leyenda propuesta por el *International Geosphere Biosphere Program (IGBP)*. Se encontró que las sabanas y pastizales tienen la mayor superficie quemada seguidas por matorral y bosques frondosos perennifolios (tabla 4).

DISCUSIÓN

Los valores en área quemada identificados por L3JRC son muy superiores a los anotados previamente (Armenteras et al. 2005, IDEAM 2004), sin embargo, insuficientes frente a los presentados por Romero et al. (2010). Por ejemplo, Armenteras et al. (2005) encontraron que el total de área quemada en los Llanos Orientales fue tan solo de 4.882 km² entre diciembre de 2000 y marzo de 2001, mientras que en una sola escena Landsat de febrero de 2004 de esta misma zona se identificaron más de 8.500 km². La diferencia en este caso puede deberse a diferencias climáticas muy marcadas entre el año 2001 y el año 2004, o a la omisión de los productos de área quemada utilizados en 2000-2001. También se encuentran diferencias notables con los informes de entidades gubernamentales. El promedio anual de área quemada L3JRC determinado en este estudio

Tabla 4. Total de área quemada (L3JRC) por tipo de vegetación durante el periodo de estudio en Colombia (**At** = área total; **Aq** = área quemada)

Clase IGBP	At (km²)	Aq (km²) 2001-06	%
Cuerpos de agua	14.843	80	0,5
Coníferas perennifolias	6.858	106	1,5
Fronosas perennifolias	713.576	2.158	0,3
Fronosas caducifolias	3.877	232	6
Bosque mixto	6.850	463	6,8
Matorral cerrado	2.435	763	31,3
Matorral abierto	24.270	9.575	39,5
Sabana arbolada	44.608	8.002	17,9
Sabana	171.340	27.169	15,9
Pastizal	109.744	38.013	34,6
Humedales	2.010	47	2,3
Cultivos	8.314	33	0,4
Mosaico de cultivos	26.562	45	0,2
Suelo-vegetación dispersa	3.289	196	6
Total	1.139.799	86.885	7,6

para Colombia es de 14.807 km² mientras que los valores reportados por el IDEAM no superan los 1.600 km² (IDEAM 2004). La incertidumbre en los registros existentes en el ámbito nacional es tan alta que para la estimación de gases efecto invernadero “se asume que la sabana se quema en su totalidad una vez cada tres años” (González 1998). Por otro lado, los resultados presentados por Romero et al. (2010) confirman la subestimación de L3JRC. Con el producto L3JRC se estima que el 20% de la Orinoquia se ha quemado por lo menos una vez entre 2001-2006, mientras que en el periodo 2000-2008 Romero et al. (2010) estiman que el 66,5% de las sabanas se quemó al menos una vez. En términos de área los resultados son igualmente dispares, mientras con L3JRC se estima un promedio anual quemado para Colombia de 14.807 km², Romero et al. (2010) estimó un

promedio de 27.500 km² tan solo en los Llanos. Si bien hay una ligera diferencia temporal en ambos estudios, la explicación se centra en los altos valores de omisión detectados en L3JRC.

El mapa L3JRC es bastante consistente en el espacio y en el tiempo, con errores de omisión y comisión similares y aceptables para el nivel de detalle utilizado. Durante el proceso de validación, se observaron numerosas áreas quemadas en el interior de la zona boscosa, con un tamaño aproximado de 6 ha, por ejemplo en las escenas Landsat (p007r058 y p008r054) o CBERS (p187r096), que debido a su resolución espacial fueron omitidas de forma recurrente. Estas áreas, aunque pequeñas, son especialmente sensibles de cara a las emisiones de gases efecto invernadero, ya que un bosque primario puede contener biomasa viva superior a las 300 Mg ha⁻¹,

mientras que un pastizal difícilmente supera las 15 Mg ha⁻¹ (Anaya et al. 2009). Por tanto, se sugiere evaluar los fuegos activos en zonas boscosas, como posible alternativa para identificar incendios pequeños en este tipo de cobertura. La alta omisión encontrada en la validación de área quemada se traduce en una subestimación debida a los algoritmos, mientras que la comisión está asociada principalmente al tamaño del píxel. El conjunto de errores de omisión y comisión resulta en una infravaloración del total de área quemada y por tanto de las emisiones de gases efecto invernadero.

CONCLUSIONES

Uno de los mayores retos en la validación de productos de área quemada es lograr la máxima coherencia temporal entre las imágenes de referencia y el producto de área quemada por evaluar. Esto solo es posible si ambos tuvieran la fecha de detección en cada píxel. El producto L3JRC hace explícito el primer día de la detección de área quemada en cada uno de los píxeles. Sin embargo, determinar la fecha exacta en que se produjo el fuego en cada polígono quemado que se identifica en las imágenes Landsat o CBERS no es posible. Cada polígono quemado puede tener una fecha distinta, con lo cual el intérprete queda supeditado a estimar el número de días que pueda tener el área quemada interpretada. Se podría asumir que la escena de referencia es representativa del fuego en todo el año, pero esto no es cierto dado que las áreas quemadas más antiguas ya no se verían. En la matriz de confusión, aquellas áreas que han sido quemadas y que debido a su antigüedad no se identifiquen (pérdida de la señal), resultarían en *falsos errores de comisión*. Solo si tuviéramos alta frecuencia temporal de imágenes de referencia (comparación de cambios entre escenas) podríamos disminuir esta incertidumbre, sin embargo, esto se dificulta mucho debido a la altísima frecuencia de nubes en el área de estudio.

Los errores de comisión son menores que los errores de omisión, lo cual coincide con los resultados encontrados por Tansey et al. (2007) para África. Los errores de comisión parecen estar más relacionados con la resolución espacial, aumentando en la medida en que aumenta el tamaño del píxel, mientras que los errores de omisión podrían estar asociados a las áreas quemadas de menor tamaño.

Con L3JRC se estima un promedio anual de área quemada para Colombia de 14.807 km², sin embargo el promedio es cercano a los 21.000 km² si se tiene en cuenta la subestimación (> 40%) y los altos errores de omisión encontrados en la validación. Las regiones de los Llanos y el Caribe presentan la mayor ocurrencia de incendios, sin embargo la situación de la Amazonia es preocupante por el alto número de incendios en los departamentos de Meta y Caquetá, aquí los incendios son de menor tamaño pero ocurren en una matriz de bosque, indicando altas tasas de deforestación y producción de gases efecto invernadero. En la imagen Landsat para esta zona columna (*path*) 008 fila (*row*) 056 (no incluida en los análisis) se identificaron más de 10.000 incendios en los primeros meses de 2007. Resultados preliminares, que requieren estudios posteriores, indican tendencia espacio temporal diferencial de ocurrencia de incendios en Colombia. Si bien los meses de mayor ocurrencia se encuentran entre enero y marzo en todo el país, el sur tiene mayor actividad entre enero y febrero mientras que el norte tiene mayor actividad entre marzo y abril.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo de la Universidad de Medellín a través del proyecto “Estimación de emisiones por biomasa quemada en Colombia”, la Universidad de Alcalá (España) y la Unión Europea a través de las becas de alto nivel para América latina AlBan N.º E05D059391CO.

REFERENCIAS

- Anaya JA, Chuvieco E, Palacios-Orueta A. 2009. Above ground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*, 257: 1237-1246.
- Armenteras D, Romero M, Galindo G. 2005. Vegetation fire in the savannas of the Llanos Orientales of Colombia. *World Resource Review*, 17: 628-640.
- Aronoff S. 1982. The map accuracy report: A user's view. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48: 1309-1312.
- Boschetti L, Brivio PA, Eva H, Gallego J, Baraldi A, Gregoire JM. 2006. A sampling method for the retrospective validation of Global Burned Area Products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44: 1765-1772.
- Chuvieco E, Opazo S, Sione W, Del Valle H, Anaya J, Di Bella C, Cruz I, Manzo L, Lopez G, Mari N, Gonzalez F, Morelli F, Setzer A, Csiszar I, Karpandegui A, Bastarika A, Libonari R. 2008. Global burned land estimation in Latin America using MODIS Composite Data. *Ecological Applications*, 18: 64-79.
- Friedl MA, McIver DK, Hodges JCF, Zhang XY, Muchoney D, Strahler AH, Woodcock CE, Gopal S, Schneider A, Cooper A. 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83: 287-302.
- González F. 1998. Inventario preliminar de gases de efecto invernadero, fuentes y sumideros: Colombia-1990. Bogotá (Colombia): Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Colección Jorge Álvarez Lleras, # 11. p. 171.
- Gregoire JM, Tansey K, Silva JMN. 2003. The GBA2000 initiative: developing a global burnt area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24 1369-1376.
- Hoelzemann JJ, Schultz MG, Brasseur GP, Granier C. 2004. Global Wildland Fire Emission Model (GWEM): Evaluating the use of global area burnt satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 109: 1-18.
- IDEAM. 2004. Incendios: Una amenaza más para los bosques tropicales. En: Colombia, SdiEFp (Ed.). Fecha de acceso: junio 2010. Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/temas/incendios/>>.
- Mavdt. 2002. Plan nacional de prevención. Control de incendios forestales y restauración de áreas afectadas. Fecha de acceso: junio 2010. Disponible en: <<http://www.cardique.gov.co/Plan%20Nacional%20Prevencion%20Incendios%20Forestales.pdf>>.
- Mesa O, Poveda G, Carvajal L. 1997. Introducción al clima de Colombia [tesis]. [Medellín (Colombia)]: Facultad de Minas. Posgrado en Aprovechamiento de recursos hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. p. 390.
- Morissette JT, Privette JL, Justice CO. 2002. A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing of Environment*, 83: 77-96.
- Nepstad D, Verissimo A, Alencar A, Nobre CA, Lima E, Lefebvre P, Schlesinger P, Potter C, Moutinho P, Mendoza E, Cochrane M, Brooks V. 1999. Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, 398: 505-508.
- Opazo S, Chuvieco E. 2007. Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas. *Revista de Teledetección*, 27: 27-43.
- Quintano C, Fenández A, Delgado de la Mata JA, Shimbukuro YE. 2002. Determination of spectral mixture analysis validity for estimating burned area using AVHRR data and multitemporal analysis. En: Viegas DX (editor). *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Rotterdam: Millpress. p. 1-10.
- Roman-Cuesta RM, Retana J, Gracia M, Rodriguez R. 2005. A quantitative comparison of methods for classifying burned area with LISS-III imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 1979-2003.
- Romero-Ruiz M, Etter A, Sarmiento A, Tansey K. 2010. Spatial and temporal variability of fires in relation to ecosystems, land tenure and rainfall in savannas of northern South America. *Global Change Biology*, 16: 2013-2023.
- Roy DP, Boschetti L, O'Neal K. 2006. MODIS Collection 5 Burned Area Product MCD45 User's Guide, Version 1.0. Maryland (E. U. A.): University of Maryland.
- Roy DP, Jin Y, Lewis PE, Justice CO. 2005. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*, 97: 137-162.
- Simon M, Plummer S, Fierens F, Hoelzemann JJ, Arino O. 2004. Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOBSCAR products and their qualification. *Journal of Geophysical Research*, 109: 1-16.
- Tansey K, Grégoire J-M, Pereira JMC, Defourny P, Leigh R, Pekel J-F, Barros A, Silva JNM, van Bogaert E, Bartholomé E, Bontemps S. 2007. L3JRC - A global multi-year (2000-2007) burnt area product (1 km resolution and daily time steps). *Remote Sensing and Photogrammetry Society Annual Conference 2007*. Newcastle upon Tyne, UK.
- Tansey K, Gregoire JM, Binaghi E, Boschetti L, Brivio PA, Ershov D, Flasse SP, Fraser R, Graetz D, Maggi M, Peduzzi P, Pereira JMC, Silva JNM, Sousa A, Stroppiana D. 2004. A global inventory of burned areas at 1 km resolution for the year 2000 derived from spot vegetation data. *Climatic Change*, 67: 345-377.