

Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio

JEAN-FRANÇOIS MAS (COORDINADOR)

Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio

JEAN-FRANÇOIS MAS (COORDINADOR)



Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio

Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio

JEAN-FRANÇOIS MAS (COORDINADOR)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
Instituto Nacional de Ecología (INE)
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA)

Primera edición: 2011

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Blvd. Adolfo Ruiz Cortines 4209. Col. Jardines en la Montaña

C.P. 14210. Delegación Tlalpan, México, D.F.

www.semarnat.gob.mx

Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)

Periférico Sur 5000. Col. Insurgentes Cuicuilco

C.P. 04530. Delegación Coyoacán, México, D.F.

www.ine.gob.mx

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental

Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex Hacienda de san José de la Huerta

C: P. 58190. Morelia, Michoacán

www.ciga.unam.mx

DISEÑO DE LA PORTADA: Álvaro Figueroa

FOTO DE PORTADA: Earth Observatory

ISBN: 978-607-7908-55-5

Impreso y hecho en México • *Printed in Mexico*

Índice

AGRADECIMIENTOS	9
1 PRESENTACIÓN DEL SENSOR MODIS Tzitziki Janik García-Mora, Jean-François Mas	11
2 MODLAND: LOS PRODUCTOS DE SUPERFICIE TERRESTRE MODIS Tzitziki Janik García-Mora, Jean-François Mas	25
3 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE LOS DATOS MODIS Gerardo López Saldaña, René Colditz, María Isabel Cruz López, Rainer Ressler, Jean-François Mas	71
4 UNA REVISIÓN DEL USO DE MODIS PARA EL MAPEO Y MONITOREO DE LAS CUBIERTAS TERRESTRES Tzitziki Janik García-Mora, Jean-François Mas y Everett Alan Hinkley	97
5 DETECCIÓN OPERACIONAL DE DEFORESTACIÓN Y DE ÁREAS QUEMADAS EN TIEMPO CASI REAL POR MEDIO DE IMÁGENES DEL SENSOR MODIS Yosio E. Shimabukuro, João R. Santos, Bernardo F. T. Rudorff, Egídio Arai, Valdete Duarte, André Lima	123

6	SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA INCENDIOS FORESTALES EN MÉXICO	145
	María Isabel Cruz López, Gerardo López Saldaña, Rainer Ressler, René Colditz	
7	PROGRAMA DE MAPEO PARA FUEGOS ACTIVOS MODIS	173
	Everett Hinkley, Brad Quayle, Brian Schwind	
8	MONITOREO DE PROPIEDADES Y PROCESOS ECOSISTÉMICOS CON ÍNDICES DE VEGETACIÓN MODIS	195
	Alfredo R. Huete, Ramón Solano-Barajas, Edward P. Glenn, Natalia Restrepo-Coupe	
9	EVALUACIÓN DE MÉTODOS Y PRODUCTOS DERIVADOS DEL SENSOR MODIS PARA LA CARTOGRAFÍA DE LA CUBIERTA DEL SUELO EN MÉXICO	231
	Tzitziki Janik García-Mora, Jean-François Mas	
10	EFFECTOS DE LA AGREGACIÓN ESPACIAL EN LA ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA DEL AIRE MEDIANTE IMÁGENES MODIS	253
	Edgar Ricardo Rosales Arriaga, Felipe Omar Tapia Silva	
11	EVALUACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN MÉXICO: ACIERTOS Y SESGOS DEL MAPA DERIVADO DEL SENSOR MODIS	275
	Stéphane Couturier	
	AUTORES	309
	ÍNDICE ANALÍTICO	313

Agradecimientos

Este libro se elaboró en el marco de los proyectos Evaluación del sensor MODIS para el monitoreo anual de la vegetación forestal de México (Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONAFOR-CONACYT, clave 47741) y Sistema de monitoreo de la deforestación en México (Fondo sectorial de investigación para la educación, SEP-CONACYT, clave 14741).

Cada capítulo de este libro fue revisado al menos por dos especialistas. Se agradece a las personas citadas a continuación su valiosa participación en dicha labor:

Msc. Ing. Egídio Arai, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

Dra. Elizabeth Barona, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.

Dr. Gerardo Bocco, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dr. René Colditz, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

Dr. Patrick Coronado, Computational and Information Sciences and Technology Office, National Aeronautics and Space Administration, EE.UU.

Dr. Stéphane Couturier, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

M. en Geog. María Isabel Cruz López, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

- Dr. Ivan Csiszar, NOAA/NESDIS Center for Satellite Applications and Research
Camp Springs, Maryland, EE.UU.
- Ms. Sonia Delphin, WWF Paraguay Atlantic Forest Ecoregional Office, Asunción,
Paraguay.
- Dr. Laurent Durieux , Institut de Recherche pour le Développement, Francia.
- Dr. Fatih Evrendilek, Department of Environmental Engineering, Faculty of
Engineering & Architecture, Abant Izzet Baysal University, Turquía.
- Dr. Alfredo R. Huete, Department of Environmental Sciences, University of
Technology, Sydney, Australia.
- Dra. Lilia de Lourdes Manzo Delgado, Instituto de Geografía, Universidad Nacional
Autónoma de México, México.
- Dr. Douglas Morton, Biospheric Sciences Branch, NASA Goddard Space Flight
Center, Greenbelt, MD, EE.UU.
- Dr. Marco Follador, European Commission, Joint Research Centre, Institute for
Environment and Sustainability, Climate Change Unit Ispra, Italia.
- Dr. José Luis Palacio Prieto, Centro de Enseñanza Para Extranjeros, Universidad
Nacional Autónoma de México, México.
- Dr. José M. Paruelo, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires,
Argentina.
- Dra. Carmen Quintano, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de
Valladolid, España.
- Lic. Heidi Resnikowski, Especialista en Análisis Espacial, Santa Cruz, Bolivia.
- Dr. Yosio Shimabukuro, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos
Campos, SP, Brasil.
- Dra. Virginia Venturini, Centro de Estudios Hidro-Ambientales, Universidad
Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.
- Dra. Marta Yebra Álvarez, Universidad de Alcalá, España.

Presentación del sensor MODIS

Tzitziki Janik García-Mora, Jean-François Mas

RESUMEN

Las actividades humanas han cambiando drástica y rápidamente la cobertura de nuestro planeta, por esta razón diversos grupos especializados, gobiernos e instancias internacionales, se han unido para abordar esta problemática. A finales de la década de los 1980 comenzaron a llevarse a cabo proyectos creados para el monitoreo de la cobertura terrestre, principalmente a través del sensor AVHRR, cuyos resultados fueron suficientemente alentadores para la creación de otros sensores dirigidos al monitoreo de las coberturas terrestres. Dentro de estos sobresale el sensor llamado espectroradiómetro para imágenes de resolución moderada, o MODIS, por sus siglas en inglés, que fue creado por un equipo científico interdisciplinario. Este sensor está a bordo de dos plataformas, Terra y Aqua. Sus datos cuentan con una alta sensibilidad radiométrica, buena calidad geométrica, alta resolución temporal, y son distribuidos de manera gratuita a través de diferentes portales de internet. Los datos crudos pueden obtenerse de manera directa contando con la tecnología necesaria; en México se cuenta con una antena y un equipo de trabajo para su procesamiento y distribución dentro de la CONABIO. Las experiencias derivadas de los trabajos con MODIS han permitido explorar una gran cantidad de aplicaciones potenciales que, al acercarse el fin de sus operaciones, podrían aplicarse a la siguiente etapa de observación de la tierra a través del sensor VIIRS próximo a lanzarse.

INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas han cambiando drásticamente la cobertura de nuestro planeta: los cultivos y pastizales se han expandido ocupando cerca del 40% de la cobertura mundial del suelo. Hace ya varias décadas se puso de manifiesto que los cambios de cobertura y de uso de suelo influyen directamente en los ciclos hidrológicos, la pérdida de biodiversidad, la erosión de los suelos y el aumento de gases que incrementan el efecto invernadero. Los cambios climatológicos provocan el aumento y la intensidad de los desastres naturales en todo el planeta como son los incendios, las inundaciones, los huracanes y las sequías (FAO, 2007).

En este contexto aparecen esfuerzos de grupos especializados, gobiernos e instancias internacionales para abordar esta problemática. Dentro de las reuniones más destacadas se encuentra la Convención de Estocolmo en 1972, que trajo como consecuencia el interés de la comunidad científica en realizar investigaciones respecto a las interacciones entre la atmósfera, la hidrosfera y la superficie terrestre para poder entender mejor las causas y consecuencias de las actividades humanas en el planeta.

Desde finales de la década de los 1980, se llevaron a cabo proyectos creados para el monitoreo de coberturas globales, como el International Geosphere Biosphere Programme (IGBP), que permitió el mapeo de la cobertura terrestre usando los datos del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Este sensor, a bordo de los satélites de la serie NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), fue originalmente creado para el monitoreo climatológico. Presenta una resolución espacial de 1.1 kilómetro y permitió crear bases de datos globales con más de dos décadas de datos gracias a las adquisiciones diarias de imágenes. Para el mapeo de coberturas terrestres se usaron principalmente composiciones multi-fecha de sus índices de vegetación (Cihlar 2000). Sin embargo, los datos AVHRR no son los más idóneos para estudios de las coberturas terrestres, porque tienen una baja resolución espacial, el ángulo de barrido es muy amplio (55,4 grados a ambos lados) lo cual implica notables problemas geométricos y radiométricos en las imágenes resultantes, además de los problemas de contaminación atmosférica de los píxeles extremos (Chuvieco, 1995), cuentan con una baja resolución espectral (solo 5 bandas con rangos espectrales amplios) y una alta predisposición a la saturación (Ichoku *et al.* 2003).

No obstante, los datos AVHRR tuvieron resultados suficientemente alentadores para motivar la creación de sensores diseñados específicamente para el monitoreo de las coberturas terrestres, la alta resolución temporal permite abarcar en una sola toma extensas regiones. Dentro de estos proyectos de percepción remota, el más ambicioso es el Earth Observing System (EOS) de la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio), cuyo principal objetivo es la observación continua de los cambios globales, lo cual incluye el estudio integrado de la atmósfera, de los océanos y de la superficie terrestre.

En 1988 NASA consultó distintas agencias espaciales y a la comunidad científica para seleccionar de manera formal cada uno de los sensores a bordo de las diferentes plataformas y se seleccionaron 30 instrumentos con sus respectivos "equipos de ciencia", así como veinte proyectos de investigación Interdisciplinaria.

La política para el manejo de datos del EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System) se basa en dos principios: la no discriminación y la no exclusividad. La no discriminación está basada en la igualdad de trato para todos los usuarios en términos de acceso y uso de los datos al más bajo costo posible para la investigación científica. La no exclusividad se basa en que nadie haga uso indebido de los datos, y que las investigaciones realizadas deben ser publicadas en la literatura científica y de acceso público (Sadeh, 2002).

Dentro del proyecto EOS sobresale el sensor llamado espectroradiómetro para imágenes de resolución moderada (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS*) a bordo de dos plataformas, que por sus características espaciales y espectrales es uno de los más importantes para el monitoreo de los procesos de cambio en la tierra. MODIS fue diseñado por un equipo interdisciplinario de científicos con una vasta experiencia en sensores remotos. Este equipo trabajó por cerca de 10 años para finalmente definir los requisitos para la toma, calibración y procesamiento de los datos (Xiong, 2008). El equipo científico de MODIS Land (MODLAND) desarrolla métodos y algoritmos para generar productos sobre cubiertas terrestres.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SENSOR MODIS

Especificaciones del sensor MODIS

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites Terra o EOS-AM (lanzado en diciembre de 1999) y Aqua o EOS-PM (lanzado en mayo de 2002).

La órbita de ambas plataformas es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de 98.2° y 98° y una altitud media de 708 y 705 km respectivamente (NASA MODIS WEB, 2008). Terra está programada para pasar de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana en su órbita descendente, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador a las 1:30 de la tarde, un esquema del cubrimiento MODIS se presenta en la figura 1. Las primeras imágenes captadas por Terra se obtuvieron en Febrero del año 2000. Ambas plataformas monitorean la totalidad de la superficie terrestre cada 1 o 2 días dependiendo de la latitud.

FIGURA 1. SISTEMA DE ESCANEEO DEL SENSOR MODIS (IMAGEN TOMADA DE [HTTP://SOS.NOAA.GOV/IMAGES/ATMOSPHERE/AQUA_SWATH.JPG](http://sos.noaa.gov/images/atmosphere/aqua_swath.jpg))



El instrumento MODIS cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales, en un rango de longitud de onda que va de los 0.4 μm a los 14.4 μm (Ver tabla 1). Las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre 0.405 nm y 2.155 nm. Las bandas de la 1 a la 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas 8 a la 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a 19 para las mediciones atmosféricas. Las bandas 20 a la 36, cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro de (3,660-14,385 nm) (NASA, 2008). Dos bandas son tomadas a una resolución nominal de 250 m al nadir, cinco bandas a 500 m y las 29 bandas restantes a 1 km. MODIS posee una alta calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre (error RMS inferior a 50 m).

El sensor MODIS es un explorador de barrido: un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria con un ángulo de $\pm 55^\circ$ permite explorar una franja de terreno (swath) a ambos lados de la traza del satélite, cuyo ancho es de 2,330 km. El sistema óptico es un telescopio con dos espejos fuera

TABLA 1. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL SENSOR MODIS. [HTTP://MODIS.GSFC.NASA.GOV/ABOUT/SPECIFICATIONS.PHP](http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php)

Órbita	Altitud: 708 km (Terra) y 705 km (Aqua), pasando en el ecuador a 10:30 a.m. nodo descendente (Terra) y a la 1:30 p.m.; nodo ascendente (Aqua), heliosíncrona, casi polar, circular.
Tasa de escaneo	20.3 rpm, ortogonal a la órbita
Dimensiones de la franja escaneada	2.330 km (ortogonal) por 10 km (a lo largo de la órbita, al nadir)
Telescopio	17.78 cm diámetro con planos de desvío intermedarios
Tamaño	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Peso	228.7 kg
Poder	162.5 W (promedio orbital)
Tasa de transferencia de datos	10.6 Mbps (pico); 6.1 Mbps (promedio orbital)
Codificación	12 bits
Resolución espacial	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-36)
Vida útil	6 años

de su eje focal que direccionan la radiación incidente a cuatro sistemas ópticos reflectantes, uno para cada región espectral (visible, infrarrojo cercano, medio y térmico). Para las bandas del visible y del infrarrojo cercano se utiliza una nueva tecnología de fotodiodos de silicio. Para el infrarrojo térmico se usan detectores de Telureto de Mercurio-Cadmio (HgCdTe).

Algunos datos técnicos y aplicaciones se encuentran en la tabla 2 así como una descripción técnica muy detallada de los materiales se encuentra disponible en el portal de la NASA <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/scanmirror.php>.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS ESPECTRALES

Uso principal	Banda	Ancho de banda ¹	Radianza espectral ²	SNR ³ o NE (delta) T requerido T(K) ⁴
Limites de Tierra/Nubes/aerosoles	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Propiedades de Tierra/Nubes/aerosoles	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Color del océano / fitoplancton/biogeoquímica	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
Vapor de agua atmosférico	17	890 - 920	10.0	167
	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	250
Temperatura de la superficie/nubes	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05*

TABLA 2. CONTINÚA

Uso principal	Banda	Ancho de banda ¹	Radianza espectral ²	SNR ³ o NE (delta) T requerido T(K) ⁴
Temperatura atmosférica	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00*
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07*
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07*
	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25*
Vapor de agua de nubes Cirrus	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25*
	26	1.360 - 1.390	6.00	150
Propiedades de las nubes	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25*
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25*
	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05*
Ozono	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25*
Temperatura de la superficie/nubes	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05*
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05*
Altitud de las nubes	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25*
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25*
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25*
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35*

¹ Bandas de la 1 a la 19 están en nm; Bandas de la 20 a la 36 en μm .

² Los valores de radianza espectral están en $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$.

³ SNR = ratio de señal-ruído.

⁴ NE(delta) T requerido = Diferencia de temperatura equivalente al ruido (*).

Deformaciones relacionadas con el barrido (ángulo de visión)

Un problema del procedimiento de captura de datos de barrido es que el campo instantáneo de vista del sensor aumenta en los extremos de la imagen llegando a

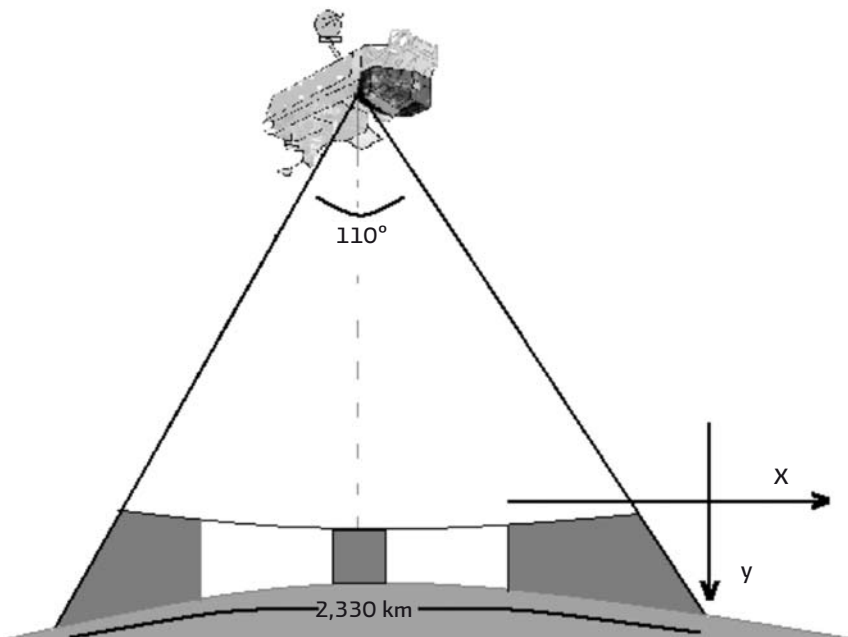
tener una deformación de 5 veces el tamaño del pixel en el eje Y y dos en el eje X (Ver figura 2). Estas deformaciones se conocen con el efecto Bowtie y consiste en la presencia de líneas repetidas cerca de los bordes de las imágenes MODIS que ocurre debido al barrido de 10 líneas. No obstante existen programas para corregir este defecto, los pixeles a los bordes de la imagen deben ser empleados con cautela.

Transmisión y preprocesamiento de los datos

Junto con todos los datos de otros instrumentos a bordo de Terra y Aqua, los datos MODIS se transfieren a las estaciones en tierra en White Sands, Nuevo México, a través del seguimiento y retransmisión de datos desde el sistema de satélites (*Tracking and Data Relay Satellite System -TDRSS*).

Una de las características que distinguen a MODIS de cualquier otro instrumento es que no solo se puede tener acceso a los datos después de su captura

FIGURA 2. ÁNGULO DE VISIÓN DEL SENSOR MODIS



y almacenamiento para la posterior descarga, además, tiene la capacidad de poder transmitir de manera directa los datos crudos que colecta a una base en tierra (Direct Broadcast). El instrumento de MODIS Terra fue uno de los primeros satélites en operar con una transmisión directa de datos, de manera constante y con disponibilidad de que cualquiera con el equipo y software adecuados pueda obtener estos datos gratuitamente.

Los datos son enviados al sistema de datos y operaciones del *EOS Data and Operations System (EDOS)* al centro espacial de vuelo Goddard. El nivel 1A, nivel 1B, georreferencia y los productos libres de nube, así como los de suelo y atmósfera de más alto nivel son producidos por un sistema de procesamiento adaptable (MODAPS) y posteriormente, son repartidos a tres centros activos de almacenamiento (DAACs por sus siglas en inglés) para su distribución.

Los distintos datos derivados de las observaciones de MODIS pueden obtenerse desde diferentes fuentes, MODIS nivel 1 y productos de atmósfera están disponibles en el portal de Nivel 1 y Sistema de Distribución de Archivos de la Atmósfera (LAADS por sus siglas en inglés) <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>. Los productos para aplicaciones terrestres a través del centro de datos EROS de Estados Unidos en el portal <http://daac.gsfc.nasa>, los productos de cobertura de nieve y hielo se obtienen a través del portal del Centro de Vuelos Espaciales Goddard (GSFC por sus siglas en inglés) <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html>.

La obtención de imágenes satelitales de MODIS se estuvo realizando por un largo periodo de tiempo a través del portal del Earth Observing System Data Gateway <http://redhook.gsfc.nasa.gov> requiriendo de un sencillo registro previo. A partir del 25 de junio de 2008 la nueva herramienta denominada Warehouse Inventory Search Tool (WIST) a través del portal <http://wist.echo.nasa.gov> comenzó el reemplazo al primero migrando gradualmente a sus usuarios y esperando quedar como sitio definitivo en el transcurso del 2008.

En México, la CONABIO recibe diariamente imágenes del sensor MODIS de los satélites Terra-1 y Aqua-1. Las imágenes MODIS de julio de 2004 a la fecha están a disposición del público a partir del portal http://www.conabio.gob.mx/informacion/geo_espanol/modis/modis_ftp.html. Las imágenes están calibradas, rectificadas y en formato Generic Binary, little-endian (CONABIO, 2009).

Niveles de procesamiento

Los productos MODIS son divididos en cinco niveles (0 a 4) en función del grado de procesamiento realizado:

- Nivel 0: Son los datos brutos sin ningún tratamiento, sólo los artefactos de comunicación han sido eliminados, como por ejemplo los paquetes de sincronización y los encabezados de comunicación entre el satélite y la estación de recepción.
- Nivel L1: Son los datos de geolocalización (identificados como MOD03) que contiene coordenadas geodésicas, información sobre la elevación del terreno, máscara de tierra/agua, ángulo de elevación, cenit y azimut del satélite y del sol.
- Nivel 1A: Son los productos utilizados para la geolocalización, la calibración y el procesamiento. Contienen los niveles de radiancia (MOD01) de las 36 bandas, junto con datos auxiliares del sensor y del satélite como coeficientes de calibración radiométrica y corrección geométrica, parámetros de georreferenciación (efemérides de la plataforma).
- Nivel 1B: Son los productos que contienen las radiancias calibradas y con geolocalización (MOD02) para las 36 bandas generadas por el nivel 1A. Es por lo tanto una imagen radiométricamente corregida y calibrada a unidades físicas. Datos adicionales incluyen estimaciones de calidad, del error y datos de calibración.
- Nivel L2G: Son los productos que contienen variables geofísicas proyectadas en una malla uniforme. Los datos adquiridos durante un periodo fijo de tiempo (12 o 24 horas) son agrupados en una cuadrícula de 1,200 x 1,200 km, llamado tile, en la proyección sinusoidal de igual área.
- Nivel L2: Son los productos que contienen variables geofísicas. Estos productos se generan a partir del producto nivel L1B aplicando correcciones atmosféricas y algoritmos bio-ópticos. Algunos de estos productos se presentan en el capítulo a continuación. Estos productos generados pueden ser almacenados en gránulos, que corresponden a 5 minutos de datos colectados por MODIS, de tal forma que cada gránulo es de aproximadamente 2,340 x 2,330 km.
- Nivel 3: Son productos de valor agregado derivados de variables geofísicas mapeadas. En algunos casos, se realiza un remuestreo a una menor resolución espacial que las bandas originales y se elaboran compuestos de intervalos de tiempo establecidos (1, 8, 16 y 30 días). Algunos productos de nivel 3 que se describen en el capítulo siguiente son; reflectancia (MOD09), índices

de vegetación (MOD13), temperatura y emisividad de la superficie terrestre (MOD11) y puntos de calor e incendios (MOD14).

- Nivel 4: Son los productos generados por la incorporación de los datos MODIS en modelos para así estimar variables geofísicas (NASA, 2008). Estos productos se generan usando productos nivel L2 y datos auxiliares. Algunos ejemplos de estos productos que se presentan en el capítulo siguiente son el índice de área foliar / fracción de radiación activa fotosintética (MOD15), las coberturas del suelo (MOD12) y la producción primaria (MOD17).

Los productos de nivel 0, 1 y 2 son presentados en “gránulos”, que corresponden a los datos sin proyectar tomados durante el paso del sensor durante cinco minutos, lo cual representa un área de aproximadamente 2,340 x 2,330 km. Los datos de niveles 2G, 3, y 4 son distribuidos en mosaicos en proyección sinusoidal llamados tiles de aproximadamente 10 x 10 grados. La organización de estos datos en tiles se describe en el capítulo 2.

CONTINUIDAD DE DATOS: DE MODIS A VIIRS

La utilización del sensor MODIS ha dejado una gran experiencia y conocimiento en la comunidad científica, y debido a que el final de sus operaciones se acerca ya se prepara el sensor que dará continuidad a este tipo de datos. Este sensor es VIIRS, siglas en inglés de *Visible Infrared Imager Radiometer Suite*. Su cobertura espectral va de los 412 nm a los 12 micrones. Será el primero en viajar a bordo del *National Polar-orbiting Operational Satellite System* (NPOESS) proyecto preparatorio (NPP). Proporcionará mediciones similares a las de MODIS pero en 22 bandas, las imágenes tienen una resolución de ~375 m al nadir en 5 bandas y de ~750 m al nadir en las bandas restantes. Cuenta con una cobertura global completa, productos de nubes, propiedades de aerosoles, tierra y océanos, temperatura de la superficie del océano tierra y hielo y detección de incendios. En este sensor se reduce el alargamiento del pixel en los límites de escaneo, la cobertura espectral es ligeramente menor, las bandas infrarrojas son más largas para CO₂, el sistema de telescopio rotatorio permite un mejor control de la luz, la órbita es más alta, lo que permite una cobertura global completa en un día (de ~705 Km. a ~830 Km.). La calidad radiométrica y calidad espectral es similar a MODIS con datos de 12 bit, las calibraciones a bordo del satélite también son parecidas a las de MODIS, el impacto en el índice de vegetación es mínimo. La reducción de bandas de 36 en MODIS

a 22 en VIIRS se compensa en parte debido a las 7 bandas de amplificación dual en VIIRS que pueden ser usadas tanto para obtener datos de cobertura terrestre como de superficies oceánicas, ya que cuenta con un sistema que permite ajustar las mediciones del sensor de acuerdo a la superficie observada.

Los algoritmos de VIIRS surgen del aprovechamiento y mejora de la herencia de MODIS, esperando dar continuidad a estos datos con coherencia.

CONCLUSIONES

Las plataformas Terra y Aqua cuentan con varios sensores, lo que representa grandes ventajas al obtener diferentes tipos de información con las mismas condiciones atmosféricas, de ángulo de iluminación y de observación y permitiendo la intercalibración entre sensores.

El sensor MODIS presenta diversas innovaciones en relación a sus precursores debido a que fue diseñado por científicos del área de ciencias de la tierra. Existe una mejoría sustancial en la calidad de los detectores en el sistema de escaneo, un aumento del número de bandas espectrales y el enorme avance en el procesamiento de los datos con algoritmos específicos para la generación de productos de alta calidad con correcciones atmosférica, radiométrica y geométrica. Fue diseñado para operar durante un largo periodo con la misma configuración básica y operación en dos horarios. La aplicación de los datos MODIS varían desde la detección y monitoreo de incendios, estado actual y cambios de la cobertura terrestre, albedo, monitoreo del clima, hasta prevención de desastres naturales y epidemiología. Todos los productos y datos son distribuidos gratuitamente a través de internet así como los programas para su procesamiento. Los productos MODIS aun están en una fase de calibración, a la fecha de escribir este artículo (julio de 2008) el reprocesamiento de la colección 5 acaba de terminar. Ya se prepara lo que será la continuación de los datos MODIS a través del sensor VIIRS tomando en cuenta la experiencia obtenida con sus precursores.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se llevó a cabo en el ámbito de los proyectos Evaluación del sensor MODIS para el monitoreo anual de la vegetación forestal de México (Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONAFOR-CONACyT, clave 47741) y Sistema de monitoreo de la deforestación

en México (Fondo sectorial de investigación para la educación, SEP-CONACYT, clave 14741).

REFERENCIAS

- Cihlar, J., 2000. Land cover mapping of large areas from satellites: Status and research priorities. *International Journal of Remote Sensing*. 21(6): 1093-1114.
- Chuvieco, E. 1995. *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia. Barcelona España. 586 pp.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2008. Imágenes MODIS, URL: http://www.conabio.gob.mx/informacion/geo_espanol/modis/modis_ftp.html (Última fecha de acceso: 09 de Septiembre de 2008).
- , 2008. Imágenes de Satélite en Línea, URL: http://www.conabio.gob.mx/informacion/geo_espanol/doctos/imagsatelite.html (Última fecha de acceso: 09 de Septiembre de 2008).
- Earth Observing System Data Gateway, 2008. Search for and order earth science data products from NASA and affiliated centers, URL: <http://redhook.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome/> (Última fecha de acceso: 1 de octubre de 2008).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2008. Climate Change and Food Security: A Framework Document, URL: <http://www.fao.org/forestry/media/15538/0/0/> (Última fecha de acceso: 15 de septiembre de 2008).
- Goddard Space Flight Center, LAADS WEB, 2008, URL: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html> (Última fecha de acceso: 30 de septiembre de 2008).
- Goddard Space Flight Center, 2008. URL: <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html> (Última fecha de acceso: 25 de septiembre de 2008).
- Ichoku C., Y. J. Kaufman, L. Giglio, Z. Li, R. H. Fraser, J.-Z. Jin And W. M. Park, 2003. Comparative analysis of daytime fire detection algorithms using AVHRR data for the 1995 fire season in Canada: perspective for MODIS. *International Journal of Remote Sensing* 24 (8): 1669–1690p.
- Running, S.W., Justice, C.O., Salomonson, V.V., Hall, D., Barker, J., Kaufman, Y.J., Strahler, A.H., Huete, A.R., Muller, J.P., Vanderbilt, V., Wan, Z.M., Teillet, P., Carneggie, D., 1994. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17):427-439p.
- National Aeronautics and space Administration, 2008. MODIS WEB, URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/> (Última fecha de acceso: 5 de septiembre de 2008).

- , 2008. MODIS WEB, Scan Mirror. URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/scanmirror.php> (Última fecha de acceso: 5 de septiembre de 2008).
- , 2008. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, URL: <http://daac.gsfc.nasa.gov/> (Última fecha de acceso: 3 de septiembre de 2008).
- , Warehouse Inventory Search Tool. URL: <http://wist.echo.nasa.gov> (Última fecha de acceso: 1 de octubre de 2008).
- Sadeh, E., 2002. A failure of international space cooperation: the International Earth Observing System, *Space Policy*, 18(2):135-150p.
- Science on a Sphere, 2008. URL: http://sos.noaa.gov/images/atmosphere/aqua_swath.jpg (Última fecha de acceso: 30 de septiembre de 2008).
- Xiong J., 2008. MCST Calibration Information, URL: <http://www.mcst.ssai.biz/mcst-web/calib/calibration.html> (Última fecha de acceso: 28 de septiembre de 2008).

CAPÍTULO 2

Modland: los productos de superficie terrestre MODIS

Tzitziki Janik García-Mora, Jean-François Mas

RESUMEN

Debido a la gran cantidad de productos MODIS, a menudo en diferentes versiones y resoluciones espaciales y temporales, el usuario principiante puede sentirse un poco confuso. En este capítulo se presentan de manera concisa los productos enfocados al estudio de las cubiertas terrestres (MODLAND). Después de una presentación muy general de estos datos, se describe la cadena de producción y evaluación de los datos. Posteriormente se describen las características generales de los productos MODLAND, incluyendo las diferentes versiones, la organización espacial de los datos así como la nomenclatura usada para identificar los productos, el formato de almacenamiento y los metadatos.

En la segunda parte de este documento se delinean cada uno de los productos. Se incluye una definición de las características de la cobertura terrestre caracterizadas en el producto, los métodos usados para su elaboración y validación, sus principales características. Para cada producto, se presentan dos tablas, indicando respectivamente 1) el algoritmo de producción y las referencias claves; y 2) cada subproducto y sus características.

INTRODUCCIÓN

Con base en los datos MODIS, se elabora una gran variedad de productos enfocados al estudio de los océanos (MOcean), la atmósfera (MODIS Atmosphere), la criósfera y las cubiertas terrestres (MODLAND). En este capítulo, se tratan más a detalle los productos relacionados con la caracterización de la cobertura terrestre, que son elaborados por un grupo de científicos que conforman el equipo MODLAND, encargado de producir los datos enfocados a la investigación del complejo terrestre y el cambio global (Justice *et al.*, 2002).

Estos productos pueden dividirse en tres grandes grupos (Morisete *et al.*, 2002):

- Variables relacionadas con el balance de energía: estas incluyen la reflectancia de la superficie (MOD09), la cobertura de nieve (MOD10), la temperatura y la emisividad de la superficie terrestre (MOD11), el albedo y la función de la distribución de la reflectancia bi-direccional (MOD43).
- Variables biofísicas relacionadas con la vegetación que comprenden los índices de vegetación (MOD13), el índice de área foliar o LAI por sus siglas en inglés y la fracción de radiación activa fotosintética FPAR (MOD15) y la producción primaria (MOD17).
- Características de la cobertura terrestre: coberturas del suelo (MOD12), puntos de calor e incendios (MOD14), conversión de la cobertura vegetal y fracción de vegetación (MOD44) y finalmente áreas quemadas (MCD45).

Este capítulo se divide en tres secciones: 1) una presentación general de la cadena de producción de los productos MODLAND y su relación con los niveles de procesamiento, 2) una descripción de las características comunes a todos los productos (organización espacial y temporal, formatos de almacenamiento, convención usada para nombrar los archivos) y 3) una breve exposición de cada producto.

PRODUCCIÓN DE LOS DATOS MODLAND Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD

La elaboración de los productos MODLAND sigue una cadena de procesamiento claramente definida y ampliamente documentada (Justice *et al.*, 1998 y 2002a) (Figura 1). Los datos de nivel 1A (MOD01) sirven de insumo para generar MOD02

así como datos de geolocalización que incluyen elevación, ángulos de observación e inclinación solar. Los productos de nivel L2 necesitan información atmosférica como máscara de nube (MOD35), aerosoles (MOD04), vapor de agua (MOD05), perfiles atmosféricos (MOD07). La elaboración de ciertos productos como MOD09 (reflectancia de la superficie) o MOD11 (temperatura y emisividad) requiere de productos de más alto nivel producidos anteriormente (temperatura, parámetros de distribución de la función de reflectancia bidireccional). Datos adicionales del nivel L2 brindan información sobre los ángulos de observación y solares. El insumo más importante para los datos de nivel L3 y L4 es la reflectancia de la superficie. Los datos de nivel L3 están organizados en composiciones espaciales (mosaicos "tiles") y temporales (datos de 8, 16, 30 días por ejemplo). Finalmente, los productos de nivel L4 se derivan de los productos de nivel anterior y además de datos adicionales (información climática por ejemplo) y/o usan modelos para su generación.

La evaluación de la calidad de los productos MODIS forma parte integral del proceso de producción y tiene el objetivo de estimar y documentar la calidad científica de los productos MODLAND con respecto a la calidad esperada (Roy *et al.*, 2002). La calidad de los productos se brinda como metadata a nivel de imagen y en una capa adicional para cada pixel. Se generan diferentes índices sobre la calidad (Quality Assessment, QA) para cada pixel. Estos índices se almacenan en capas de información que forman parte del producto y brindan información como, dependiendo del producto, la fiabilidad de la estimación del valor del parámetro representado, el éxito de las correcciones, la presencia de nube, aerosol, vapor de agua, ozono o si el pixel corresponde a tierra o agua.

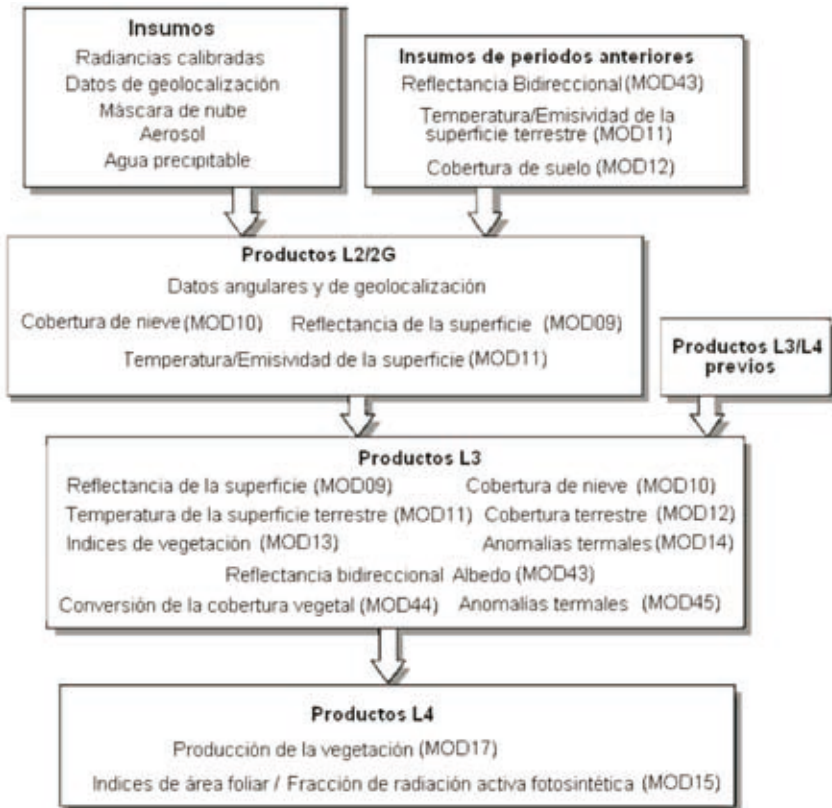
Los productos MODIS están sujetos a un proceso de validación que incluye comparaciones con datos tomados *in situ* en sitios de prueba, comparaciones con datos y productos de otro sensores como ASTER, AVHRR, Ikonos, MISR, TM/ETM+, y con datos de referencia obtenidos de manera independiente (Morissette *et al.*, 2002 y 2003). El proceso de validación pasa por cuatro fases (Nightingale *et al.*, 2009):

Fase 1. La fiabilidad del producto se estimó usando medidas independientes obtenidas de un pequeño número de sitios y periodos de tiempo.

Fase 2. La evaluación se hizo con base en un amplio grupo de sitios y fechas además de contar con muchos datos de campo.

Fase 3. La fiabilidad se obtuvo a través de medidas independientes hechas de manera sistemática y estadísticamente robusta que representa las condiciones

FIGURA 1. DIAGRAMA DE PRODUCCIÓN DE LOS DATOS MODLAND. ALGUNOS PRODUCTOS COMO MOD44 Y MOD45 PODRÍAN CONSIDERARSE COMO DE NIVEL L4 (MODIFICADO DE ROY ET AL., 2002)



globales. Por lo tanto, existen estimadores de la incertidumbre de estos productos. Se considera que, aunque puedan generarse versiones mejoradas, estos productos son idóneos para su uso en publicaciones científicas.

Fase 4. Los resultados de validación de la fase 3 se actualizan cuando se libera una nueva versión del producto.

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las colecciones

A medida que se perfeccionan o se corrigen los algoritmos de elaboración, se generan versiones (o colecciones) mejoradas. Todos los productos archivados se reprocesan, incluyendo los productos de fechas anteriores, por lo cual las colecciones más recientes brindan un mejor desempeño. Actualmente, la mayoría de los productos se encuentran en la versión 5. Respecto a las colecciones anteriores a la 5, se mejoraron las máscaras de nube y sombra que ahora incluyen los píxeles adyacentes a las nubes y las capas sobre calidad, se refinó la corrección atmosférica, se mejoró la corrección del área de costa y se aumentó la congruencia entre los productos de diferente resolución espacial. En muchos casos, se eliminaron capas de información poco útiles o al contrario se incorporaron nuevas capas. Las principales mejoras de la colección 5 respecto a las anteriores se encuentran descritas a detalle en el portal de la NASA.¹

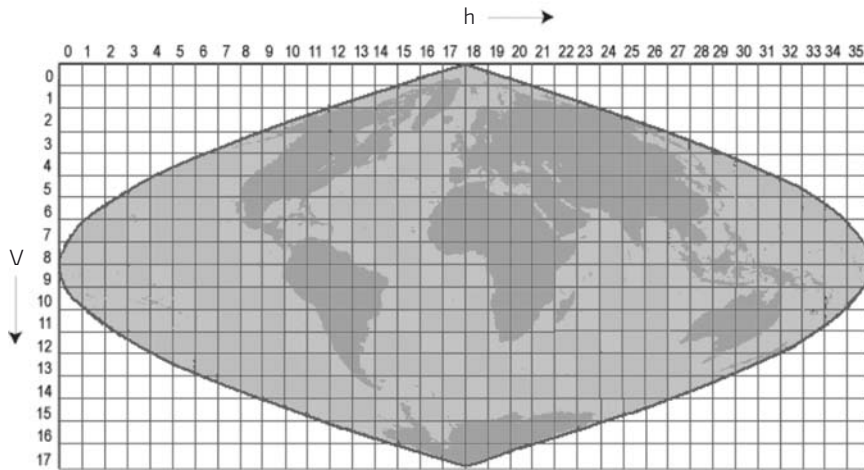
Organización espacial

Dependiendo del nivel de procesamiento, los productos MODIS presentan diferentes formas de organización espacial. Los que corresponden al nivel L2, corresponden a los datos colectados por el sensor, de tal forma que el tamaño de cada escena depende del ancho de la traza (aproximadamente 2,330 km) y del tiempo de colecta: Los gránulos que corresponden a 5 minutos de colecta son de aproximadamente 2,340 x 2,330 km.

La mayoría de los productos de MODLAND son del nivel L2_G, 3 y 4 y están organizados en una retícula de 1,200 x 1,200 km (10 por 10 grados al ecuador) en proyección sinusoidal (SIN). Cada cuadro, llamado *tile*, se localiza por un número de columna (h) y línea (v). Así por ejemplo la parte continental del territorio mexicano está cubierta en su totalidad por los mosaicos h08v06, h8v07, h09v06, h09v07. En la figura 2 se presenta la retícula de mosaicos MODIS, donde 188 cuadros indicados en blanco no contienen información y los 134 cuadros azules indican 100% de agua. En el capítulo 4 se describen algunas herramientas que permiten cortar y reproyectar estos *tiles*.

1 http://landweb.nascom.nasa.gov/cgi-bin/QA_WWW/newPage.cgi?fileName=MODLAND_CO05_changes.

FIGURA 2. ORGANIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS MODLAND EN TILES



Finalmente, algunos productos, llamados Malla de Modelado Climático (Climate Modeling Grid, CMG por sus siglas en inglés), representan toda la superficie terrestre a una resolución espacial baja (0.05° que corresponden a 5,600 m aproximadamente) en proyección geográfica.

Formato de almacenamiento HDF

Los productos MODLAND se encuentran en el formato *Hierarchical Data Format* (HDF), desarrollado por el Centro Nacional de Aplicaciones de Supercomputación (NCSA). De acuerdo al NCSA, este formato de archivo físico, en el nivel más sencillo sirve para almacenar datos como cualquier otro formato, pero en su nivel de más complejidad, es una colección de aplicaciones y utilidades para manipular los datos (Fishtaler, 1998). El formato HDF presenta diferencias con el formato EOS-HDF por lo que pueden surgir problemas en el procesamiento de datos. Por ejemplo el software LDOPE genera archivos HDF que no son compatible con la herramienta MRT que acepta solo datos en formato EOS-HDF (para más información sobre las herramientas ver el capítulo 4).

Identificación de los productos

Los productos MODIS se nombran a través de la convención adoptada por la NASA. Las diferentes porciones del nombre del archivo permiten conocer la plataforma, el nombre del producto, su fecha de adquisición, versión y localización (Figura 3).

FIGURA 3. NOMENCLATURA UTILIZADA PARA LOS NOMBRES DE LOS PRODUCTOS MODIS DE NIVEL LZG O SUPERIOR

Gránulo

NOM.Aaaaaddd.hhmm.vvv.aaaadddhss.hdf

1 2 3 4 5

MOD14.A2007364.1805.005.2009047020343.HDF

Tile

NOM.Aaaaaddd.hxxxvyyy.vvv.aaaadddhmm.hdf

1 2 3 4 5

MOD09GA.A2002006.h08v07.005.2008182172646.hdf

MOD09CGM.A2007364.005.2008001133501.hdf

1. La primera parte del nombre largo del producto es su nombre corto. Las tres primeras letras hacen referencia a la plataforma: MOD para Terra, MYD para Aqua y MCD para datos combinados Terra/Aqua. El número se refiere al tipo de producto CMG indica el producto global "Climate Modeling Grid".
2. Después de la letra A aparece la fecha de adquisición (año y día juliano en los cuatro primeros y tres últimos dígitos respectivamente). Por ejemplo A2007364 indica el año 2007, día juliano 364 (29 de diciembre).
- 3a. En los productos en gránulos (nivel 2) sigue la hora (hora, minutos) del inicio de la colecta de datos.
- 3b. En los productos organizados en tiles aparece las coordenadas h, v del tile. Por ejemplo, h08v07 indica la retícula 08 es el horizontal y 07 en la vertical. Este campo no existe para los productos CMG.

4. Sigue la versión de procesamiento o colección, en los ejemplos de la figura 3 la cinco.
5. Finalmente aparece la fecha de procesamiento (año, día juliano, hora, minuto y segundo): 2008182172646 indica: Año 2008, día juliano 182 (30 de junio), horario 17 hrs. 26 min y 46 seg.

Metadata

Los productos MODIS tienen dos fuentes de metadatos. El metadato interno, encapsulado en el HDF, y el metadato externo ECS ("EOSDIS Core System"). El metadato HDF contiene información valiosa como los atributos globales y específicos del dato. El metadato externo es un documento en formato XML, que se entrega con el producto MODIS y contiene parte de la información del metadato HDF.

Algunas características importantes de ciertos atributos de los metadatos de MODIS son los siguientes:

- Xdim e Ydim representan respectivamente el número de filas y columnas.
- La mayoría de los productos de MODLAND usan la proyección sinusoidal con una esferoide de 6,371,007,181 metros.
- Los campos "UpperLeftPointMtrs" y "LowerRightMtrs" se expresan en el sistema de coordenadas de la proyección e identifican respectivamente las esquinas arriba y a la izquierda y abajo a la derecha de la imagen. No representan las coordenadas del centro de los píxeles de las esquinas como ocurre en otros sistemas de referencia.
- Campos adicionales indican la latitud y longitud de la imagen en coordenadas geográficas.
- Los atributos de los metadatos contienen también información para cada capa de información como rango de los valores y factores de escala.

DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS MODLAND

En esta sección se describe más a detalle cada uno de los productos MODLAND siguiendo los tres grupos de productos descritos al principio de este capítulo. Se indica 1) a que característica de la cobertura terrestre se refiere, 2) como se genera (incluyendo la validación) y eventualmente como interactúa con la producción de otros productos y 3) que características tiene y como está organizado. En algunos

casos, se agregaron algunas consideraciones adicionales sobre el producto como producciones alternativas del mismo. Para cada producto, se elaboraron dos tablas, la primera indica el algoritmo de producción y las referencias claves; la segunda cada subproducto y sus características (resolución espacial y temporal, nivel de procesamiento, versión, tamaño del archivo, número de capas, y capas más importantes, entre otras). Se describe la versión más reciente disponible en mayo de 2009, la cual está indicada en la segunda tabla. Es importante resaltar que los productos están en constante evolución y las características de las diferentes versiones pueden presentar cambios notables (resolución espacial o temporal, algoritmo utilizado, capas de información, etc.).

Variables relacionadas con el balance de energía

Reflectancia de la superficie MOD09

El producto MOD09 es una evaluación de la reflectancia de las cubiertas terrestres, es decir la relación entre el flujo luminoso reflejado y el flujo luminoso incidente, tal y como hubieran sido medidos a nivel del suelo si no existiera absorción ni dispersión atmosférica.

La estimación de la reflectancia se lleva a cabo para todos los píxeles sin nubes para cada una de las siete primeras bandas del sensor MODIS. Para ello, se corrigen los efectos atmosféricos producidos por gases, aerosoles y nubes cirrus. El cálculo se realiza con base en la radiancia al nivel del sensor (MOD02, nivel 1B, ver niveles de procesamiento en capítulo 1 apartado 2.4), utilizando un procedimiento de corrección basado en un modelo de transferencia radiativa desarrollado por Tanré

TABLA 1. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD09

Clave del producto	MOD09
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf (1999)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://modis-sr.ltdri.org/MAIN_SURFACE_PRODUCTAND%20USER%20GUIDE/MOD09_UserGuide.pdf (2008)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Vermote <i>et al.</i> , 1997 y 2002
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Levy <i>et al.</i> , 2007; Vermote y Kotchenova, 2008

et al. (1986) y simplificado por cuestiones operacionales.² El modelo utiliza datos atmosféricos directamente derivados de los datos MODIS (aerosoles, vapor de agua) o, si estos no están disponibles, obtenidos por el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés). El espesor óptico de aerosoles, el parámetro más crítico para las bandas del visible y del infrarrojo próximo, se obtiene únicamente de los datos MODIS. El producto de reflectancia de la superficie es utilizado para generar varios productos MODLAND como son los índices de vegetación, la función de distribución de la reflectancia bidireccional (BDRF), las coberturas del suelo, la cobertura de nieve, los puntos de calor así como el índice de área foliar y la fracción de radiación activa fotosintética (FPAR). Durante el proceso de validación de la versión 4, la evaluación de la exactitud de los valores de reflectancia de la superficie indica un buen ajuste con una desviación de menos de 5% (Liang *et al.*, 2002).

Este producto se encuentra disponible en varias resoluciones temporales y espaciales como se indica en la tabla a continuación. Las capas de información difieren para cada producto. De manera general indican el número de observaciones, el valor de reflectancia en las diferentes bandas, los ángulos de observación y de inclinación solar. La capa de calidad indica la fiabilidad general, la presencia de nubes, la falla de algún detector, la ejecución o no de las correcciones atmosféricas. Además de los productos producidos por la NASA, la Universidad de Maryland produce un producto similar con resolución espacial de 500 m y temporal de 32 días, disponible a través del portal <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/modis/>. La CONABIO pondrá también a la disposición del público un producto similar para México a finales de 2009.

Cobertura de nieve MOD10

Los productos MOD10 indican la extensión y la cobertura fraccional de nieve, y el albedo en los productos de 500 m. La cobertura de nieve es un parámetro primordial para el balance de energía global ya que la nieve refleja gran parte de la energía solar incidente. Es también importante para el modelado hidrológico debido a la contribución del deshielo a muchas corrientes de agua. Este producto indica también la presencia de hielo en los lagos continentales mientras el producto MOD29 trata del hielo marino.

2 http://modis-sr.ltdri.org/6S_code/index.html.

TABLA 2. PRODUCTOS DE REFLECTANCIA MOD09.

Clave	MOD09GQ	MOD09GA	MOD09CMG	MOD09A1	MOD09Q1
Plataforma	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua
Resolución temporal	Diaria	Diaria	Diaria	8 días	8 días
Resolución espacial	250 m	500 y 1000 m	0.05 grados	500 m	250 m
Resolución espectral	Bandas 1-2	Bandas 1-7	Bandas 1-7	Bandas 1-7	Bandas 1-2
Extensión espacial	Tile	Tile	CMG (Global)	Tile	Tile
Nivel	L2G	L2G	L3	L3	L3
Versión	5	5	5	5	5
Fase de validación	2	2	2	2	2
Tamaño del archivo (MB)	280	85	985	64	72
Número de capas	5	12	21	13	13
Capa(s) más importante (s)	250 m Surface Reflectance Band 1-2	500 m Surface Reflectance Band 1-7	Coarse Resolution Surface Reflectance Band 1-7		
Coarse Resolution Brightness Temperature Band 20, 21, 31, 32	500 m Surface Reflectance Band 1-7	250 m Surface Reflectance Band 1-2			
Fecha inicio de producción (Terra y Aqua)	24/2/2000 4/7/2002	24/2/2000 4/7/2002	24/2/2000 4/7/2002	24/2/2000 4/7/2002	24/2/2000 4/7/2002

TABLA 3. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD10

Clave del producto	MOD10
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod10.pdf (2001)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/sug_main.html (2006)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Hall <i>et al.</i> , 2002
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Wang <i>et al.</i> , 2008 y 2009

La elaboración del producto se realiza utilizando el algoritmo SNOMAP, basado en la diferencia normalizada de las bandas del visible del infrarrojo cercano. Esta técnica se usa desde hace varias décadas para mapear coberturas de nieve con base en datos de sensores aerotransportados y de imágenes de satélite como Landsat. El algoritmo SNOMAP ha sido mejorado incorporando el NDVI para mapear la nieve en bosques densos (Klein *et al.*, 1998). En condiciones de cielo despejado, la fiabilidad de los productos de 500 m es aproximadamente de 90%, cuando el espesor de la nieve es superior a 4 cm. Sin embargo, la fiabilidad es considerablemente más baja cuando la capa de nieve es delgada o se distribuye de forma discontinua (Ault *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2008).

El producto MOD10 se elabora con base en diferentes resoluciones espaciales y temporales. A 500 m, el producto diario presenta cuatro capas de información (cobertura de nieve, calidad, albedo y proporción de cobertura de nieve) mientras el producto de ocho días presenta una capa de información que presenta la extensión máxima de la cobertura de nube y la cronología de las observaciones de nieve durante el periodo observado.

Temperatura y emisividad de la superficie terrestre MOD11

Los productos MOD11 brindan estimaciones de la temperatura y de la emisividad diurna y nocturna de las coberturas terrestres. La temperatura se mide en grados Kelvin al contacto entre la cobertura y la atmósfera. La emisividad, es un número adimensional igual al cociente entre la radiación emitida por un objeto y un cuerpo negro a la misma temperatura.

El algoritmo utilizado permite estimar la emisividad y la temperatura a partir de un par de imágenes diurnas y nocturnas tomadas en condiciones de cielo despe-

TABLA 4. PRODUCTOS DE COBERTURA DE NIEVE MODIO.

Clave	MOD10_L2	MOD10A1	MOD10A2	MOD10C1	MOD10C2	MOD10CM
Plataforma	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua
Resolución temporal	Paso *	diaria	8 días	diario	8 días	anual
Resolución espacial	500 m	500 m	500 m	0.05°	0.05°	0.05°
Extensión espacial	escena	Tile	Tile	CMG	CMG	CMG
Nivel	L2	L3	L3	L3	L3	L3
Versión	5	5	5	5	5	5
Fase de validación	2	2	2	2	2	2
Tamaño del archivo (MB)	1.5	0.2	0.08	4	4	1.7
Número de capas	3	4	2	4	2	2
Capa(s) más importante(s)	Snow_cover	Snow_cover_daily_tile	Maximum_snow_extent	Day_CMG_snow_cover	8_day_CMG_snow_cover	Snow_cover_monthly_CMG
Fecha de inicio de producción (Terra y Aqua)	5/3/2000	5/3/2000 4/7/2002	26/2/2000 4/7/2002	19/2/2000 4/7/2002	26/2/2000 4/7/2002	5/3/2000 4/7/2002

* Paso del satélite (una observación diaria aproximadamente).

jado utilizando 7 bandas del infrarrojo medio y térmico (bandas 20, 22, 23, 29 y 31-33) en cualquier tipo de cobertura de suelo (Wan y Li, 1997). Dependiendo de la cobertura del suelo que indica el producto MOD12, el algoritmo calcula la temperatura con base en la diferencia lineal entre la temperatura de brillo de las bandas 31 y 32. El algoritmo toma en cuenta el ángulo de observación y el vapor de agua, entre otros. En forma similar, la emisividad se estima tomando en cuenta la cobertura indicada por el producto MOD12 (Petitcolin y Vermote, 2002). Se llevaron a cabo campañas de validación en la estimación de temperaturas en áreas homogéneas en diferentes tipos de coberturas y mostraron un buen ajuste, con diferencia de menos de un grado para temperaturas entre -10 y 50° C (Wan et al., 2004).

Los productos MOD11 son producidos con una resolución espacial de 1,000 m con base diaria y cada 8 días (MOD11A1 y MOD11A2). Existen también productos con resolución de 6,000 m (MOD11B1) y 0.05 grados (MOD11C1 y MOD11C2).

Todos los productos MOD11 indican las temperaturas diurna y nocturna de la superficie, la calidad de las estimaciones de ambas temperaturas, la hora y el ángulo de la toma, la emisividad en las bandas 31 y 32 y las condiciones atmosféricas diurna y nocturna. Los productos de más baja resolución espacial presentan la emisividad en las bandas 20, 21, 23 y 29.

TABLA 5. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD11

Clave del producto	MOD11
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf (1999)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://www.icesc.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/usrguide.html (2009)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Wan y Li, 1997; Petitcolin y Vermote, 2002
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Wan et al., 2004, Wan y Li, 2008; Wan, 2008

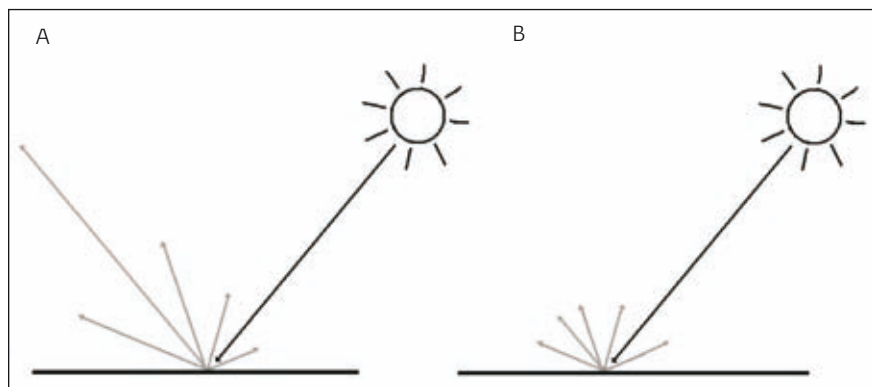
Tabla 6. PRODUCTOS DE TEMPERATURA Y EMISIVIDAD MOD11.

Clave	MOD11_L2	MOD11A1	MOD11B1	MOD11A2	MOD11C1	MOD11C2	MOD11C3
Plataforma	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua
Resolución temporal	escena	diario	diario	8 días	diario	8 días	mensual
Resolución espacial	1000 m	1000 m	6000 m	1000 m	0.05°	0.05°	0.05°
Extensión espacial	escena	Tile	Tile	Tile	CMG	CMG	CMG
Nivel	L2	L3	L3	L3	L3	L3	L3
Versión	5	5	5	5	5	5	5
Fase de validación	2	2	2	2	2	2	2
Tamaño del archivo (MB)	6	4	0.4	5	50	70	80
Número de capas	9	12	18	12	16	17	17
Capa(s) más importante(s)	LST (temperatura)						

TABLA 6. CONTINUÍA

Clave	MOD11_L2	MOD11A1	MOD11B1	MOD11A2	MOD11C1	MOD11C2	MOD11C3
Capa(s) más importante(s)	LST (temperatura) Emis_31, Emis_32	LST_Day_1km LST_ Night_1km (temperatura día y noches) Emis_31 y Emis_32 (emisividad)	LST_Day_6km LST_ Night_6km Emis_20, 22, 23, 29, 31, 32	LST_Day_1km LST_ Night_1km (temperatura día y noches) Emis_31 y Emis_32 (emisividad)	LST_Day_ CMG LST_ Night_CMG Emis_20, 22, 23, 29, 31, 32	LST_Day_ CMG LST_ Night_CMG Emis_20, 22, 23, 29, 31, 32	LST_Day_ CMG LST_ Night_CMG Emis_20, 22, 23, 29, 31, 32
Fecha de inicio de producción (Terra y Aqua)	5/3/2000 4/7/2002	5/3/2000 8/7/2002	5/3/2000 8/7/2002	5/3/2000 4/7/2002	5/3/2000 8/7/2002	5/3/2000 4/7/2002	5/3/2000 1/7/2002

FIGURA 4. SUPERFICIE ANISOTRÓPICA (A) E ISOTRÓPICA (B)



BRDF/Albedo MOD43

La serie de productos MOD43 describe el albedo, los parámetros de distribución de la función de reflectancia bidireccional (BRDF por sus siglas en inglés) que caracteriza la anisotropía de las coberturas del suelo y la reflectancia corregida por esta función. La superficie terrestre es anisotrópica, es decir que dependiendo del ángulo de iluminación solar, la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones como ocurría con una superficie isotrópica (véase figura 4).

Debido a la anisotropía de las coberturas terrestres, la reflectancia superficial depende de las propiedades espectrales de la radiación incidente, y también de la dirección desde la cual dicha superficie es iluminada y vista, es decir, de la geometría iluminación-visión (sol-sensor) con la cual es captada. La dependencia de la reflectancia superficial en la geometría sol-sensor es descrita por la Función de

TABLA 7. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD43

Clave del producto	MOD43
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf (1999)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://www-modis.bu.edu/brdf/userguide/index.html (actualizado en 2004)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Lu <i>et al.</i> , 2000, Schaaf <i>et al.</i> , 2002
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Privette <i>et al.</i> , 2004; Stroevé <i>et al.</i> , 2005; Liu <i>et al.</i> , 2009; Vermote <i>et al.</i> , 2009

Distribución de Reflectancia Bidireccional (BRDF), la cual permite ajustar los valores de la reflectancia para minimizar los efectos de la anisotropía. Esto es particularmente importante en el caso de sensores que tienen ángulos de observación muy amplios como MODIS. El albedo, relación (expresada en porcentaje) de la radiación que refleja cualquier superficie sobre la radiación que incide sobre la misma, es un parámetro muy importante para evaluar el balance energético de nuestro planeta.

El algoritmo permite evaluar los parámetros de un modelo semi empírico, que permite describir la anisotropía de cada pixel tomando en cuenta la dispersión y las sombras (Lucht *et al.*, 2000). Se necesitan por lo menos siete observaciones de buena calidad (libres de nube) para obtener la inversión completa del modelo. Para obtener los valores de reflectancia corregidos, los parámetros de la Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional (BRDF) se aplican a las reflectancias del producto MODO9 tomando en cuenta el ángulo solar al mediodía local. La comparación entre las reflectancias ajustadas y datos de Landsat mostraron una buena correspondencia (Liang *et al.*, 2002; Román *et al.*, 2009).

El producto se genera únicamente a partir de los datos Terra y Aqua combinados y brinda: 1) los coeficientes de las funciones matemáticas que describen la BRDF de cada pixel en las primeras siete bandas espectrales (MOD43A1, B1, C1), 2) el albedo para estas siete bandas y tres bandas más anchas (0.4-0.7, 0.7-3.0, y 0.4-3.0 micrómetros) (MOD43A3, B3, C3), 3) las reflectancias ajustadas al nadir (MOD43A4, B4, C4) y índices de calidad de estas variables (MOD43A2, B2, C2). Se presentan estimaciones de 1) la reflectancia bihemisférica ("White Sky") que se puede definir como el albedo en ausencia de la componente directa cuando la componente difusa es isotrópica y 2) la reflectancia direccional esférica ("Black Sky") que se define como el albedo en ausencia de la componente difusa en función del ángulo cenital solar. Ya que la BRDF y el albedo se calculan con base en múltiples observaciones del mismo pixel, el producto es un compuesto de 16 días que se produce cada 8 días. Dos productos consecutivos presentan por lo tanto un solapamiento temporal y es posible elaborar series de tiempo con observaciones cada 8 días.

TABLA 8. PRODUCTOS DE BRDF/ALBEDO MOD43

Clave	MOD 43A1	MOD 43A2	MOD 43A3	MOD 43A4	MOD 43B1	MOD 43B2	MOD 43B3	MOD 43B4	MOD 43C1	MOD 43C2	MOD 43C3	MOD 43C4
Plataforma	Combinado											
Resolución temporal	16 días	16 días	16 días	16 días	16 días	16 días	16 días	16 días	16 días	16 días	16 días	16 días
Resolución espacial	500 m	500 m	500 m	500 m	1000 m	1000 m	1000 m	1000 m	0.05°	0.05°	0.05°	0.05°
Extensión espacial	Tile	Tile	Tile	Tile	Tile	Tile	Tile	Tile	CMG	CMG	CMG	CMG
Nivel	L3	L3	L3	L3	L3	L3	L3	L3	L3	L3	L3	L3
Versión	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Fase de validación	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Tamaño del archivo (MB)	41	1	31	16	11	0.4	9	4	231	137	185	83
Número de capas	11	4	20	7	11	4	20	7	34	33	24	11

TABLA 8. CONTINUÍA

Clave	MOD 43A1	MOD 43AZ	MOD 43A3	MOD 43A4	MOD 43B1	MOD 43B2	MOD 43B3	MOD 43B4	MOD 43C1	MOD 43C2	MOD 43C3	MOD 43C4
Capa(s) más importante(s)	parámetros de modelo BRDF_ Albedo_ Parameters_ Band1-7	BRDF_ Albedo_ Quality	Albedo_ BSA_ Band_1-7 Albedo_ WSA_ Band_1-7	Nadir_ Reflec- tance_ Band1-7	BRDF_ Albedo_ Parameters_ Band1	BRDF_ Albedo_ Quality	Albedo_ BSA_ Band_1-7 Albedo_ WSA_ Band_1-7	Nadir_ Reflec- tance_ Band1-7	BRDF_ Albedo_ Parameter 1,2,3_ Band1-7, nir, vis, shortwave	BRDF_ quality	Albedo_ BSA_ Band_1, nir, vis, shortwave Albedo_ WSA_ Band_1, nir, vis, shortwave	Nadir_ Reflec- tance_ Band1-7
Fecha de inicio de producción (Terra y combinado)	24/2/2000 18/2/2000	24/2/ 2000 18/2/ 2000	24/2/ 2000	24/2/ 2000	24/2/ 2000 18/2/ 2000	24/2/ 2000 18/2/ 2000	24/2/ 2000	24/2/ 2000	24/2/ 2000 18/2/ 2000	24/2/ 2000 18/2/ 2000	24/2/ 2000	24/2/ 2000

Variables biofísicas relacionadas con la vegetación

Índices de vegetación MOD13

El producto MOD13 presenta dos índices de vegetación (IV): El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación mejorado (EVI). El NDVI se produce mediante el cálculo del cociente normalizado de la banda del infrarrojo cercano y la banda del rojo.

$$NDV = \frac{R_{IRC} - R_R}{R_{IRC} + R_R} \quad (1)$$

Donde, R_{IRC} y R_R son respectivamente los valores de reflectancia bidireccional de la superficie para las bandas del infrarrojo cercano y rojo. Este índice da continuidad al NDVI obtenido con base en el sensor AVHRR para extender el registro de datos a mayor plazo en los estudios de monitoreo.

El índice mejorado de vegetación (EVI), se optimizó a partir del NDVI aumentando la sensibilidad en las regiones de alta biomasa y mejoró el monitoreo de la vegetación mediante la disociación de la señal del fondo del dosel y una reducción de la influencia atmosférica. La ecuación utilizada para su obtención se indica a continuación:

$$EVI = G \frac{R_{IRC} - R_R}{R_{IRC} + C_1 R_R - C_2 R_A + L} \quad (2)$$

Donde:

R_{IRC} , R_R y R_A son respectivamente los valores de reflectancia bidireccional de la superficie para las bandas del infrarrojo cercano, del rojo y del azul con una corrección de los efectos de la atmósfera (Absorción de ozono y Rayleigh).

L es un ajuste del fondo del dosel que toma en cuenta la transferencia radiante diferencial del infrarrojo cercano y el rojo a través del dosel,

G es un factor de ganancia, y

C_1 , C_2 son los coeficientes de resistencia de aerosoles, que usan la banda azul para corregir la influencia del aerosol en la banda roja. Los coeficientes adoptados en el algoritmo EVI son $L=1$, $C_1=6$, $C_2 = 7.5$, y $G = 2.5$.

El algoritmo para elaborar los compuestos de 16 días opera para cada pixel, y consiste en seleccionar las “mejores” observaciones. Debido a los traslaples de la órbita del sensor existe un número importante de observaciones en el ciclo de observación de 16 días. Sin embargo, MODIS es un sensor de barrido que causa una distorsión en el tamaño del pixel en un factor de 4. Solo los pixeles vistos al nadir poseen una distorsión mínima. El número de pixeles aceptable en un compuesto de 16 días generalmente se reduce a menos de 10 e incluso menos de 5 especialmente si consideramos una media global de cobertura de nube de 50-60%. Una vez colectados los datos, el algoritmo aplica un filtro basado en la calidad, presencia de nubes y geometría de observación y solo los pixeles de mayor calidad se toman en cuenta para la elaboración del compuesto (Van Leeuwen *et al.*, 1999).

Existen dos métodos operacionales para elaborar el compuesto: 1) MVC: compuesto de valor máximo y 2) CV-MVC: filtro por ángulo de visión seguida de un compuesto de valor máximo. La técnica empleada depende del número y la calidad de las observaciones. El valor máximo es una metodología similar a la usada con los datos AVHRR, donde el valor que se toma es el del valor máximo presentado por el NDVI. Es eficiente con datos no corregidos por contaminación atmosférica (Holben, 1986). El defecto del MVC es de favorecer la selección de pixeles con ángulos de observación fuera del nadir. En el caso de MODIS, los efectos de anisotropía de la superficie son más pronunciados ya que los valores de reflectancia están previamente corregidos antes de la composición y el cálculo del índice de

TABLA 9. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD13

Clave del producto	MOD13
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf (1999)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://tbrs.arizona.edu/project/MODIS/UserGuide_doc.php (fecha no especificada)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Huete <i>et al.</i> , 1997 y 2002
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Glenn <i>et al.</i> , 2008, Huete <i>et al.</i> , en este libro

vegetación, lo cual aumenta dramáticamente la selección de píxeles fuera del nadir sobretodo en dosel abierto que muestra mayor valor del NDVI cuando se ven de manera oblicua.

El método CV-MVC se diseñó para limitar las grandes variaciones angulares encontradas por el MVC. El CV-MVC compara los dos valores más grandes del NDVI y selecciona la observación más cercana a la del nadir para representar el ciclo del compuesto de 16 días. En la versión 5, el método CV-MCV utiliza también un criterio contextual para descartar los píxeles vecinos que presentan una importante variación temporal con el fin de aumentar la cohesión espacial de la imagen.

Los índices de vegetación se producen como compuestos de 16 días y mensuales de manera global a resoluciones de 250, 500, 1000 metros y 0.05°. Los compuestos de 16 días derivados de Terra y de Aqua presentan un desfase de 8 días, permitiendo la generación de series de tiempo con observaciones cada 8 días, siempre y cuando la calibración entre los sensores de los dos plataformas permita obtener datos totalmente compatibles. Los productos se etiquetan de la siguiente manera:

TABLA 10. PRODUCTOS DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN (INCLUYE EVI Y NDVI)

Clave	MOD 13Q1	MOD 13A1	MOD 13A2	MOD 13A3	MOD 13C1	MOD 13C2
Plataforma	Terra Aqua	Terra Aqua	Terra Aqua	Terra Aqua	Terra Aqua	Terra Aqua
Resolución temporal	16-días	16 días	16 días	Mensual	16 días	Mensual
Resolución espacial	250 m	500 m	1 km	1 km	0.05 grados	0.05 grados
Extensión espacial	Tile	Tile	Tile	Tile	CMG	CMG
Nivel	L3	L3	L3	L3	L3	L3
Fase de validación	2	2	2	2	2	2
Versión	5	5	5	5	5	5
Tamaño del archivo (MB)	5-270	2-77	1-22	0.15-20	35.5	19
Número de capas	12	12	12	11	13	13

TABLA 10. CONTINÚA

Clave	MOD 13Q1	MOD 13A1	MOD 13A2	MOD 13A3	MOD 13C1	MOD 13C2
Capa(s) más impor- tante (s)	NDVI, EVI	NDVI, EVI	NDVI, EVI	NDVI, EVI	NDVI, EVI	NDVI, EVI
Fecha de inicio de producción (Terra y Aqua)	24/2/ 2000 14/7/ 2002	24/2/ 2000 14/7/ 2002	24/2/ 2000 14/7/ 2002	18/2/ 2000 1/7/ 2002	18/2/ 2000 14/7/ 2002	18/2/ 2000 1/7/ 2002

El producto contiene un conjunto de datos que incluye: los valores del NDVI y del EVI, las reflectancias de las bandas del rojo (banda 1), infrarrojo cercano (banda 2), infrarrojo medio (banda 6) y del azul (banda 3) así como el ángulo de visión y de inclinación solar, la fecha de toma de los píxeles seleccionados del compuesto y la capa de información sobre calidad. Esta capa brinda un índice de calidad general y contiene información sobre la presencia de aerosoles, nubes, nieve así como la ejecución de correcciones atmosféricas.

Se considera que el NDVI es más sensible a la clorofila, y el EVI más sensible a las variaciones estructurales del dosel, incluyendo el índice de área foliar (LAI), el tipo y la arquitectura del dosel y la fisonomía de las plantas. Diferentes estudios de la vegetación mostraron que ambos índices se complementan entre sí mejorando la detección de cambios así como la extracción de parámetros biofísicos del dosel (Huete, 2002; Huete *et al.*, 2009 en este libro). Existe un NDVI de 250 m con resolución temporal de 16 días desarrollado por la Universidad de Maryland disponible en <http://glcfapp.umiacs.umd.edu>. En México, la CONABIO planeó la producción de los dos índices de vegetación.

Índice de área foliar / fracción de radiación activa fotosintética absorbida por la vegetación (LAI/FPAR) MOD15

El producto MOD15 presenta el índice de área foliar (LAI) y la fracción de radiación activa fotosintética absorbida por la vegetación (FPAR). El LAI define una propiedad estructural importante del dosel que es el área total de la superficie superior de las hojas por área de unidad de terreno. El FPAR mide la proporción de

radiación disponible en las longitudes de onda de la radiación fotosintéticamente activa (400 a 700 nm) que el dosel absorbe. LAI y FPAR son variables biofísicas que describen la estructura del dosel y se relacionan con tasas de energía de procesos funcionales.

El algoritmo LAI/FPAR consiste en un procedimiento principal que explota la información espectral contenida en las siete bandas de reflectancia de la superficie de MODIS. Este procedimiento equivale a resolver una ecuación inversa tridimensional del LAI/FPAR (Knyazikhin *et al.*, 1998). En caso de que el algoritmo principal falle al estimar LAI/FPAR, se utiliza un método de respaldo basado en una relación estadística con los índices de vegetación. El algoritmo requiere una clasificación de cobertura del suelo, por lo tanto tiene interfases el producto de coberturas del suelo (MOD12Q1) además del producto de reflectancia de la superficie (MOD09). A su vez, MOD15 se utiliza como insumo para el cálculo de la producción primaria neta (MOD17), productos esenciales en el cálculo de energía terrestre, carbono, procesos del ciclo del agua y bioquímica de la vegetación.

TABLA 11. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD15

Clave del producto	MOD15
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf (1999)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://cybele.bu.edu/modismisr/products/modis/userguide.pdf (2003)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Knyazikhin <i>et al.</i> , 1998; Myneni <i>et al.</i> , 2002; Privette, 2002
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Wang <i>et al.</i> , 2004; Myneni <i>et al.</i> , 2007; Steinberg y Gotees, 2009

MOD15 es un producto de un kilómetro elaborados en compuestos de 8 días. Las capas de información presentan los valores de LAI, FPAR, sus respectivas desviaciones estándar y dos capas de calidad (FparLai_OC y FparExtra_OC) las cuales brindan información sobre el éxito del algoritmo en el cálculo de las variables biofísicas, la presencia de nubes, aerosoles, nieve, falla de detector, etc.

TABLA 1.2. PRODUCTOS DE LAI/FPAR MOD15

Clave	MOD15A2
Plataforma	Terra, Aqua, combinado
Resolución temporal	8 días
Resolución espacial	1000 m
Extensión espacial	Tile
Nivel	L4
Versión	5
Fase de validación	2
Tamaño del archivo (MB)	1-2.5
Número de capas	6
Capa(s) más importante(s)	Fpar, Lai
Fecha de inicio de producción	
(Terra, Aqua y combinado)	18/2/2000 4/7/2002 4/7/2002

Producción primaria bruta y neta MOD17

La producción primaria bruta de un ecosistema es la energía total fijada por fotosíntesis por la vegetación. La producción primaria neta (o fotosíntesis neta) es la energía fijada por fotosíntesis menos la energía empleada en la respiración, es decir la producción primaria bruta menos la respiración. Cuando la producción primaria neta es positiva, la biomasa de las plantas del ecosistema va aumentando. Es lo que sucede, por ejemplo, en un bosque joven en el que los árboles crecen. Cuando el bosque envejece, sigue haciendo fotosíntesis pero toda la energía que recoge se emplea en la respiración, la producción neta es nula y la masa vegetal ya no aumenta. El producto MOD17 brinda una estimación de la producción primaria bruta y neta.

La estimación de la producción primaria neta se basa en la relación que tiene con la radiación activa fotosintética absorbida (APAR por sus siglas en inglés) (Monteith 1972). La APAR depende, por un lado, de la variación de la duración e intensidad de la radiación solar que depende de la ubicación geográfica y de la atmósfera (nubes, aerosoles) y, por otro lado, de la cantidad y geometría de las hojas de las plantas. La fracción de la radiación activa fotosintética absorbida por la

TABLA 13. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD17

Clave del producto	MOD17
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod16.pdf (1999)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://www.ntsug.umd.edu/modis/MOD17UsersGuide.pdf (2003)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Running et al., 2000
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Running et al., 2004; Heinsch et al., 2006; Coops et al., 2009

superficie (FPAR) se puede obtener a partir de las imágenes de percepción remota (ver producto MOD15). Para áreas pequeñas, con base en mediciones *in situ* de la radiación activa fotosintética (PAR), se puede deducir el valor de la APAR (APAR = PAR x FPAR). En este caso, se utilizan datos meteorológicos de la NASA para tener estimaciones de la PAR (Atlas y Luchéis, 2000). La calidad de estos datos incide directamente sobre la calidad de las estimaciones de la producción primaria bruta y neta.

El producto MOD17 tiene una resolución espacial de un kilómetro y una resolución temporal de 8 días. Presenta tres capas de información: producción primaria bruta y fotosíntesis neta expresadas en kg C / m² y una capa sobre calidad que brinda información sobre la fiabilidad de las estimaciones, el sensor utilizado, la presencia de nubes, etc.

TABLA 14. PRODUCTOS DE PRODUCCIÓN PRIMARIA MOD17

Clave	MOD17A2
Plataforma	Terra, Aqua
Resolución temporal	8 días
Resolución espacial	1000 m
Extensión espacial	Tile
Nivel	L4
Versión	5
Fase de validación	3
Tamaño del archivo	0.2
Número de capas	3
Capa(s) más importante(s)	GPP_1km

TABLA 14. CONTINÚA

Clave	MOD17A2
	PsnNet_1km
Fecha de inicio de la producción (Terra y Aqua)	18/2/2000 4/7/2002

Características de la cobertura terrestre

Coberturas del suelo MOD12

El producto MOD12Q1 es un mapa de coberturas del suelo con base en diferentes sistemas clasificatorios. MOD12Q2 brinda información sobre la dinámica de las coberturas caracterizando los ciclos fenológicos.

En su versión 5 que se divulgará en 2010, el producto MOD12Q1 es un producto combinado Terra/Aqua y se obtiene con base en una clasificación supervisada obtenida con árboles de decisión cambiando la distribución de los ejemplos de entrenamiento (*Boosting*), lo cual permite estimar las probabilidades condicionales de cada categoría para cada píxel (Friedman *et al.*, 2000). Los datos de entrenamiento incluyen 1860 sitios distribuidos en todo el mundo y representativos de la variabilidad geográfica y ecológica de las coberturas del suelo. Los datos de entrada utilizados para la clasificación son la reflectancia de las 7 primeras bandas ajustadas con la distribución de la función de reflectancia bidireccional (MOD43), el índice de vegetación EVI y la temperatura de la superficie (Friedl *et al.*, en prensa).

TABLA 15. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD12

Clave del producto	MOD12 (MCD12)
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod12.pdf (1999)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://www-modis.bu.edu/landcover/userguidelc/lc.html (2002) http://www-modis.bu.edu/landcover/userguidelc/lcc.html (2006)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Friedl <i>et al.</i> , 2002
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Friedl <i>et al.</i> , sometido; Wu <i>et al.</i> , 2008; Couturier en este libro

Las clasificaciones se refieren a cinco sistemas de clasificación: 1) el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP), el cual tiene 17 categorías incluyendo 11 categorías de vegetación natural, 3 categorías de mosaicos y 3 de coberturas no vegetales, 2) el sistema anterior modificado por la Universidad de Maryland (UMD), 3) Biomas basados en el LAI/FPAR y 4) Biomas-ciclo biogeoquímico (Biome-BCG). Estos dos últimos sistemas clasificatorios son mucho más generales y presentan solo diez categorías (Tabla 3). El último sistema de clasificación (TBT) está basado en 12 categorías funcionales de plantas (Bonan *et al.* 2002) y se usa en modelos climáticos.

TABLA 16. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN UTILIZADOS EN EL PRODUCTO MOD12 Y CÓDIGO CORRESPONDIENTE A CADA CATEGORÍA

IGBP	UMD	Biomas LAI/ FPAR	Biomas BGC	Categorías funcionales de plantas (PFT)
0 Cuerpos de agua	0. Cuerpos de agua	0. Cuerpos de agua	0. Cuerpos de agua	0. Cuerpos de agua
1. Bosque perenne de coníferas	1. Bosque perenne de coníferas	1. Pastos y cultivos de cereales	1. Vegetación perenne de coníferas	1. Bosque de coníferas perenne
2. Bosque perenne de latifoliadas	2. Bosque perenne de latifoliada	2. Matorrales	2. Vegetación perenne de latifoliadas	2. Bosque de latifoliadas perenne
3. Bosque decíduo de coníferas	3. Bosque decíduo de coníferas	3. Cultivos de latifoliadas	3. Vegetación decídua de coníferas	3. Bosque de coníferas decíduo
4. Bosque decíduo de latifoliada	4. Bosque decíduo de latifoliadas	4. Savanna	4. Vegetación decídua de latifoliadas	4. Bosque de latifoliadas decíduo
5. Bosques mixtos	5. Bosques mixtos	5. Bosque de latifoliadas perenne	5. Vegetación anual de latifoliadas	5. Matorrales

TABLA 16. CONTINÚA

IGBP	UMD	Biomás LAI/ FPAR	Biomás BGC	Categorías funcionales de plantas (PFT)
6. Matorral cerrado	6. Matorral cerrado	6. Bosque de latifoliadas decíduo	6. Vegetación herbácea anual	6. Pastos
7. Matorral abierto	7. Matorral abierto	7. Bosque de coníferas perenne	7. Áreas sin vegetación	7. Cultivos de cereales
8. Savannas arboladas	8. Savannas arboladas	8. Bosque de coníferas decíduo	8. Urbano	8. Cultivos de latifoliadas
9. Savannas	9. Savannas	9. Sin vegetación	254. No clasificado	9. Urbano/ construido
10. Pastos	10. Pastos	10. Urbano	254. No clasificado	10. Nieve y hielo
11. Humedales permanentes	12. Cultivos	254. No clasificado		11. Suelo desnudo o con vegetación escasa
12. Cultivos	13. Áreas urbanas y construidas			254. No clasificado
13. Áreas urbanas y construidas	14. Suelo desnudo o con vegetación escasa			
14. Mosaico de cultivos y vegetación natural	254. No clasificado			
15. Nieve y hielo				

TABLA 16. CONTINÚA

IGBP	UMD	Biomás LAI/ FPAR	Biomás BGC	Categorías funcionales de plantas (PFT)
16. Suelo desnudo o con vegetación escasa				
254. No clasificado				

La estructura de los datos es la siguiente: Las cinco primeras capas corresponden a los mapas basados en los cinco sistemas clasificatorios, las cinco siguientes capas son índices de calidad de cada uno de los cinco mapas (en la actualidad solo hay información para el sistema clasificatorio del IGBP, las demás capas tienen un valor de relleno), una capa indica la clase alterna más probable en el sistema de IGBP. Una evaluación de la fiabilidad del producto MOD12Q1 en el caso de México se encuentra en el capítulo XI.

En la elaboración del producto sobre la dinámica de las coberturas (MOD12Q2), se utilizan 24 meses de datos del EVI y de la temperatura de la superficie (el periodo de un año considerado ± 6 meses). La temperatura se usa para identificar periodos de 16 días durante los cuales la temperatura es demasiado baja para permitir el crecimiento vegetal. Para describir los ciclos fenológicos, la variación temporal del EVI es ajustada a funciones logísticas discontinuas (Zhang *et al.*, 2003). Cada ciclo se caracteriza por cuatro métricas que indican las fechas del principio y finales del incremento y decremento del índice de vegetación, el valor mínimo y máximo del EVI así como la integral de la función que describe el EVI entre las fechas de principio y final del periodo de crecimiento. La información sobre estas variaciones se almacena en 7 capas de información más una capa sobre calidad. El producto tiene 16 capas para poder almacenar información de ciclos de crecimiento por año. Este producto se modificará en la versión 5 que se está preparando (Ganguly *et al.*, 2009).

TABLA 17. PRODUCTOS DE COBERTURA DEL SUELO MOD012

Clave	MOD12C1	MOD12Q1	MOD12Q2	MCD12Q1)
Plataforma	Terra	Terra	Terra	Combinado
Resolución temporal	Anual	Anual	Anual	Anual
Resolución espacial	0.05°	1000 m	1000 m	500 m
Extensión espacial	CMG	Tile	Tile	Tile
Nivel	L3	L3	L3	L3
Versión	4	4	4	5
Fase de validación	1	1	1	En evaluación
Tamaño del archivo (MB)	1300	25	45	90
Número de capas	50	16	8	16
Capa(s) más importante(s)	Majority_ Land_Cover_ Type_1	Land_Cover_ Type_1	Onset_ Greenness_ Increase, Onset_ Greenness_ Decrease	Land cover type (IGBP)
Periodo de producción	2001-2004	2001-2004	2001-2004	2001-2005

Puntos de calor / incendios MOD14

El producto MOD14 indica anomalías termales, o puntos de calor, los cuales se deben generalmente a quemas agrícolas e incendios.

El algoritmo de detección utiliza las bandas 21 o 22, en el intervalo de 3.929 a 3.989 μm que cubre parcialmente el infrarrojo medio y la banda 31 en el infrarrojo térmico. Para la detección de los puntos de calor, se utilizan las temperaturas de brillantez de estas bandas, que saturan respectivamente a 500° K, 335° K y 400° K aproximadamente. La estrategia de detección de puntos de calor se basa en una detección absoluta si las temperaturas de brillantez son suficientemente altas y en una detección relativa (contraste con el entorno) para tomar en cuenta

TABLA 18. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD14

Clave del producto	MOD14
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf (2006)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://modis-fire.umd.edu/documents/MODIS_Fire_Users_Guide_2.2.pdf (2005)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Justice et al., 2002; Giglio et al., 2003
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Morisette et al., 2005

la variabilidad de la temperatura de la superficie y la reflexión de las radiaciones solares (Giglio *et al.*, 2003). El Algoritmo de detección se describe en detalle en el capítulo VI.

Estos productos tienen una resolución espacial de un kilómetro y una resolución temporal tanto diaria (MOD14A1) como de 8 días (MOD14A2). Los productos MOD14A1 (versión 5) tienen cuatro capas de información: 1) máscara de incendios que los indica con tres niveles de fiabilidad (baja, media y alta) así como otra información (agua, pixel no procesado...), 2) capa de calidad (QA) sobre la fiabilidad con la cual se detectó el punto de calor y los parámetros utilizados por el algoritmo de detección (uso de la banda 21 o 22, detección absoluta o relativa, tamaño de la ventana contextual, etc.), 3) capa que indica el poder radiativo del incendio y 4) capa que resume las características de los puntos de calor (longitud, latitud, valores de temperatura de brillantez de las diferentes bandas del pixel y de su entorno). El producto MOD14A2 solo presenta una capa de máscara de incendios y otra de calidad (QA).

La CONABIO produce un producto similar para México y América Central. Una descripción del programa de detección de incendios de esta institución se encuentra en el capítulo VI. El capítulo VII presenta el programa implementado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América.

Conversión de la cobertura vegetal y campos continuos de vegetación MOD44

El producto MOD44A (*Vegetation Cover Conversion*) está diseñado como un sistema de alarma global para los cambios de coberturas del suelo. Las versiones actuales se enfocan en la deforestación, pero se trabaja para que en versiones fu-

TABLA 19. PRODUCTOS DE REFLECTANCIA MOD014

Clave	MOD14	MOD14A1	MOD14A2
Plataforma	Terra, Aqua	Terra, Aqua	Terra, Aqua
Resolución temporal	Diario	Diario	8 días
Resolución espacial	1000 m	1000 m	1000 m
Extensión espacial	Escena	Tile	Tile
Nivel	L2	L3	L3
Versión	5	5	5
Fase de validación	1	1	1
Tamaño del archivo	0.4	0.5	0.04
Número de capas	3	4	2
Fecha de inicio de producción	24/2/2000	24/2/2000	24/2/2000
Capa(s) más importante(s)	Fire mask	Fire mask	Fire mask

TABLA 20. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MOD44

Clave del producto	MOD44
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod29.pdf (1999)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod29.pdf (MOD44B, 2003)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Hansen <i>et al.</i> , 2002a; Zhan <i>et al.</i> , 2002
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Hansen <i>et al.</i> , 2002b

turas se tomen en cuenta áreas inundadas. El producto está diseñado para dar estimaciones conservadoras de los cambios, tratando de reducir al mínimo posible los errores de comisión (falsas alarmas) y no pretende ser útil para estimar la superficie de las áreas desmontadas.

Se elabora cuatro veces al año, con base en la comparación de tres meses de un año con los tres mismos meses del año anterior. La comparación se basa en un producto intermedio que evalúa la cobertura forestal a partir de la composición de 16 días reflectancia diaria (MOD09). Se comparan por lo tanto el porcenta-

je de cobertura forestal de seis periodos de 16 días de dos años consecutivos. Estos porcentajes de cobertura están clasificados en categorías abarcando rango de cobertura. Para que se considere que hubo deforestación se debe observar una disminución de la cobertura forestal (paso a categoría de menor cobertura) para por lo menos dos periodos.

El producto MOD44A, con una resolución espacial de 250 m, presenta diferentes capas de información: 1) Una capa sobre cambio (*Labeled Land Cover Change*), 2) 12 capas que indican la combinación de categorías de cobertura para los dos años en comparación tomando en cuenta dos sistemas clasificatorios y los 6 periodos de tiempo y, 3) Una capa de calidad que califica la fiabilidad de la información sobre cambio.

En 2006, la Universidad de Maryland divulgó otra versión de MOD44 (<http://landcover.org>). En su versión actual, este producto presenta solamente una capa de información que indica si hubo o no deforestación durante el periodo 2001-2005 (Carroll *et al.*, 2006).

La evaluación de los patrones de cobertura del suelo a pequeña escala es un insumo importante para el monitoreo y modelado de procesos ambientales. El producto MOD44B (campos continuos de vegetación) evalúa la proporción de ciertos elementos de las cubiertas como proporción de árboles, de coníferas, latifoliadas, vegetación perennifolia, decidua, vegetación no arbolada, arbustos, cultivos, otras herbáceas, coberturas desnudas, hielo y suelo desnudo (Hansen *et al.*, 2002a, 2002b y 2003b). En la actualidad, solo se ha estimado la proporción de vegetación arbolada, vegetación no arbolada y cobertura sin vegetación aparente.

Las estimaciones se derivan de las siete primeras bandas del sensor con un algoritmo de árbol de regresión supervisado con datos de entrenamiento global obtenidos con imágenes de alta resolución.

El producto tiene una resolución espacial de 500 m y 12 capas de información correspondientes a cada elemento, solo 3 de estas capas tienen información. Una próxima versión tendrá una resolución de 250 m y brindará información sobre coníferas y latifoliadas así como vegetación perennifolia y decidua. Existe otra versión de este producto, disponible a través del portal de *Global Land Cover Facility* que indica el porcentaje de vegetación arbolada, herbácea y suelo desnudo (los tres elementos sumando 100%).

TABLA 21. PRODUCTOS DE COBERTURA VEGETAL Y FRACCIÓN DE VEGETACIÓN MOD44

Clave	MOD44A	MOD44B
Plataforma	Terra	Terra
Resolución temporal	Anual	Anual
Resolución espacial	250 m	500 m
Extensión espacial	Tile	Tile
Nivel	L3	L3
Versión	3	3
Fase de evaluación	1	1
Tamaño del archivo (MB)	650	70
Número de capas	14	12
Capa(s) más importante(s)	Labeled Land Cover Change	Percent_Tree_Cover
Percent_Nontree_Cover		
Percent_Bare		
Fecha de inicio de producción	1/1/2001	1/11/2000

Áreas quemadas MCD45

MCD45A1 presenta información sobre las áreas incendiadas (extensión y fecha). Está derivado de imágenes de los sensores Terra y Aqua y utiliza las reflectancias diarias corregidas por la BRDF de los tres meses anteriores para detectar cambios rápidos que indican incendios. El algoritmo de detección de cambio utiliza la función BRDF para tomar en cuenta las diferencias del ángulo de observación entre las diferentes fechas y produce una medicación estadística de la probabilidad de cambio en comparación con una fecha anterior.

Es un producto mensual con una resolución de 500 m. Tiene ocho capas de información que indican la fecha del incendio, la calidad de la información (QA), el número de pasos utilizados, la dirección y el tipo de cobertura.

CONSIDERACIONES FINALES

Debido a la cobertura global y la alta resolución temporal de los sensores MODIS, la cantidad de datos generados es enorme. A nivel 1, se bajan 288 gránulos de cada sensor cada día. Estas imágenes entran inmediatamente en la cadena de produc-

TABLA 22. REFERENCIAS CLAVES PARA EL PRODUCTO MDC45

Clave del producto	MDC45
Liga y fecha del documento sobre el algoritmo de elaboración.	http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf (2006)
Liga y fecha de la guía del usuario	http://modis-fire.umd.edu/documents/MODIS_Burned_Area_Users_Guide_1.1.1.pdf (2008)
Artículo(s) clave(s) sobre la elaboración	Roy <i>et al.</i> 2005
Artículo(s) clave(s) adicional(es): nuevas versiones, aplicaciones	Roy y Boschetti, 2009

TABLA 23. PRODUCTOS DE ÁREAS QUEMADAS MOD45

Clave	MOD45A1 (MCD45A1)
Plataforma	Combinada
Resolución temporal	Mensual
Resolución espacial	500 m
Extensión espacial	Tile
Nivel	3
Versión	5
Fase de validación	2
Tamaño del archivo (MB)	0.25-8.25
Número de capas	8
Capa(s) más importante(s)	Burn date
Fecha de inicio de producción	1 abril 2000

ción de los productos MODIS. A partir de la versión 5 se comprimen los datos para reducir el volumen de datos, sin embargo éste alcanza varios cientos de GB diarios. Los datos MODIS se obtuvieron a partir del año 2000 y por lo tanto cubren ahora un periodo de cerca de 10 años, lo cual permite la elaboración de serie de tiempo uniforme y el seguimiento de procesos ambientales y ecológicos.

Los datos están en constante evolución por lo cual parte de la información presentada en el presente capítulo no estará totalmente actualizada al momento de consultarlo. El lector podrá referirse a las páginas de la NASA para obtener al-

gunos datos actualizados. Se está preparando la versión 6 de los productos para incorporar el mejoramiento de la calibración y geocalización de las imágenes, el perfeccionamiento de los algoritmos, nuevos productos obtenidos por la fusión de diferentes sensores (MODIS y MISR por ejemplo) y cambios de productos existentes para responder a las solicitudes de los usuarios.

AGRADECIMIENTOS

Este capítulo se elaboró en el ámbito de los proyectos *Evaluación del sensor MODIS para el monitoreo anual de la vegetación forestal de México* (clave CONAFOR-2005-14741) y *Un sistema de monitoreo de la deforestación para México* (SEP-CONACYT 47198). El segundo autor agradece CONACYT por la beca doctoral. La redacción del documento se terminó durante una estancia sabática del primer autor con el apoyo de CONACYT y de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los autores agradecen a Alan Strahler y Mark Friedl de la Universidad de Boston por la información sobre el producto MOD12.

Este estudio se llevó a cabo en el ámbito de los proyectos *Evaluación del sensor MODIS para el monitoreo anual de la vegetación forestal de México* (Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONAFOR-CONACYT, clave 47741) y *Sistema de monitoreo de la deforestación en México* (Fondo sectorial de investigación para la educación, SEP-CONACYT, clave 14741). El primer autor agradece a la beca de doctorado otorgada por CONACYT en la convocatoria 2007.

REFERENCIAS

- Atlas, R.M., Lucchesi, R., 2000. File Specific for GEOS-DAS Celled Output, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
- Ault, T.W., K.P. Czajkowski, T. Benko, J. Coss, J. Struble, A. Spongberg, M. Templin y C. Gross, 2006. Validation of the MODIS Snow Product and Cloud Mask Using Student and NWS Cooperative Station Observations in the Lower Great Lakes Region, *Remote Sensing of Environment*, 105(4):341-353.
- Bonan, G.B., Levis, S., Kergoat, L., y Oleson, K.W., 2002. Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models, *Global Biogeochemical Cycles*, 16.

- Carroll, M.L., DiMiceli, C.M., Townshend, J.R.G. Sohlberg, R.A. Hansen, M.C. y DeFries, R.S., 2006. Vegetative Cover Conversion MOD44A, Burned Vegetation, Collection 4, University of Maryland, College Park, Maryland.
- Cihlar, J. C., Ly, H., Li, Z., Chen, J., Pokrant, H. y Huang, F., 1997. Multi temporal, multi-channel AVHRR data sets for land biosphere studies—Artifacts and corrections, *Remote Sensing of Environment*, 60:35-57.
- Cihlar, J., Manak, D. y D'Iorio, M., 1994a. Evaluation of Compositing Algorithms for AVHRR Data over land, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32:427-437.
- Colditz, R.R., 2008, Time series generation and classification of MODIS data for land cover mapping, Tesis de doctorado, Universidad de Würzburg, Würzburg, Alemania, 336p.
- Coops, N.C.; Ferster, C.J.; Waring, R.H.; Nightingale, J., 2009, Comparison of three models for predicting gross primary production across and within forested ecoregions in the contiguous United States, *Remote Sensing of Environment*, 113(3): 680-690.
- Fishtahler, L., 1998. Concept for an HDF-EOS image data construct, Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 *IEEE International*, vol. 1, pp.307-308.
- Friedl M.A., D.S. Menashe, B. Tan, A. Schneider, N. Ramankutty, A. Sibley and X. Huang, en prensa, Global Land Cover Mapping at 500 m from MODIS, *Remote Sensing of the Environment*.
- Friedl, M.A., D.S. Menashe, B. Tan, A. Schneider, N. Ramankutty, A. Sibley, X. Huang, 2009 (sometido), Global Land Cover Mapping at 500m from MODIS.
- Friedl, M.A., McIver, D.K., Hodges, J.C.F., Zhang, X.Y., Muchoney, D., Strahler, A.H., Wooldcock, C.E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F. and Schaaf, C.B., 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), pp. 287-302.
- Friedman, J., Hastie, T., & Tibshirani, R., 2000. Additive logistic regression: A statistical view of boosting. *Annals of Statistics*, 28, 337-374.
- Ganguly, S., Friedl, M.A., Tan, B., Zhang, X., & Verma, M., 2009. Characterization of the MODIS Collection 5 500 m Land Cover Dynamics Product, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, in preparation.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., and Kaufman, Y., 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 87:273-282.
- Glenn, E.P., Huete, A.R., Nagler, P.L., Nelson, S.G., 2008, Relationship between -sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape, *Sensors* 8: 2136-2160.

- Goward, S.N., Markham, B., Dye, D.G., Dulaney, W. and Yang, J., 1991. Normalized difference vegetation index measurements from advanced very high resolution radiometer, *Remote Sensing of the Environment*, 35: 259-279.
- Hall, D.K., G.A. Riggs, V.V. Salomonson, N.E. DiGirolamo, K.J. Bayr, 2002, MODIS snow-cover products, *Remote Sensing of Environment* 83: 181-194
- Hansen, M., R. DeFries, J.R. Townshend, M. Carroll, C. Dimiceli y R. Sohlberg, 2003a, Vegetation Continuous Fields MOD44B, 2001 Percent Tree Cover, Collection 3, University of Maryland, College Park, Maryland, 2001.
- Hansen, M., R.S. DeFries, J.R.G. Townshend, M. Carroll, C. Dimiceli y R.A. Sohlberg, 2003b. Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm, *Earth Interactions*, 7(10):1-15.
- Hansen, M.C., R.S. DeFries, J.R.G. Townshend, L. Marufu, R. Sohlberg -Development of a MODIS tree cover validation data set for Western Province, Zambia, 2002b, *Remote Sensing of Environment*, 83:320-335.
- Hansen, M.C., R.S. DeFries, J.R.G. Townshend, R. Sohlberg, C. Dimiceli, M. Carroll, 2002a, Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 83: 303-319.
- Heinsch, F. A., M. Zhao, S. W. Running, J. S. Kimball, R. R. Nemani, K. J. Davis, P. V. Bolstad, B. D. Cook, A. R. Desai, D. M. Ricciuto, B. E. Law, W. C. Oechel, H. Kwon, H. Luo, S. C. Wofsy, A. L. Dunn, J. W. Munger, D. D. Baldocchi, L. Xu, D. Y. Hollinger, A. D. Richardson, P. C. Stoy, M. B. S. Siqueira, R. K. Monson, S. Burns, and L. B. Flanagan. 2006. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1908-1925.
- Holben, B.N., 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 7(11):1417.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. and Ferreira, L. G.: 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS Vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 83:195-213.
- Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. and Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 195-213.
- Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K. and van Leeuwen, W.J.D., 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3): 440-451.

- Ichoku C., Y. J. Kaufman, L. Giglio, Z. Li, R. H. Fraser, J.-Z. Jin and W. M. Park, 2003. Comparative analysis of daytime fire detection algorithms using AVHRR data for the 1995 fire season in Canada: perspective for MODIS, *International Journal of Remote Sensing*, 24(8):1669–1690.
- Justice C., L. Giglio, S. Korontzi, J. Owens, J.T. Morisette, D. Roy, J. Descloitres, S. Alleaume, F. Petitcolin, Y. Kaufman, 2002. The MODIS Fire Products, *Remote Sensing of Environment* 83: 244-262.
- Justice, C., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., Privette, J., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R., Knjazihhin, Y., Running, S., Nemani, R., Wan, Z., Huete, A., van Leeuwen, W., Wolfe, R., 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1228-1249.
- Justice, C.O., JRG Townshend, EF Vermote E. Masuoka, R.E. Wolfe, N. Saleous, D.P. Roy, J.T. Morisette, 2002a. An overview of MODIS Land data processing and product status, *Remote Sensing of Environment*, 83:3-15.
- Kimes, D.S., 1983. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies, *Applied Optics*, 22:1364-1373.
- Klein, A. G., Hall, D. K., & Riggs, G. A., 1998. Global snow cover monitoring using MODIS. Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Tromso, Norway (pp. 830–833).
- Knyazikhin, Y., J. V. Martonchik, R. B. Myneni, D. J. Diner, and S. W. Running. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data, *J. Geophys. Res.*, 103: 32257-32275.
- Levy, R. C., L. Remer, S. Mattoo, E. Vermote, and Y. J. Kaufman, 2007: Second-generation algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance. *J. Geophys. Res.*, 112, D13211, doi:10.1029/2006JD007811.
- Liang, S., Fang, H., Chen, M., Shuey, C.J., Walthall, C.L., Daughtry, C.S.T., Morisette, J.T., Schaaf, C.B. and Strahler, A.H., 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 149-162.
- Liu, J., C. Schaaf, A. Strahler, Z. Jiao, Y Shuai, Q. Zhang, M. Roman, J. A. Augustine, and E. G. Dutton, 2009, Validation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) albedo retrieval algorithm: Dependence of albedo on solar zenith angle, *J. Geophys. Res.*, 114., http://www-modis.bu.edu/brdf/userguide/publications/2009_Rutan_etal.pdf.

- Lucht, W., C.B. Schaaf, and A.H. Strahler, 2000, An Algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38: 977-998.
- Monteith, J., 1972, Solar radiation and productivity in tropical ecosystems, *Journal of Applied Ecology* 9: 747-766.
- Morisette, J., Privette, J., & Justice, C., 2002. A framework for the validation of MODIS Land products, *Remote Sensing of Environment*, 83:77-96.
- Morisette, J.T., Giglio, L., Csiszar, I., Justice, C.O., 2005, Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data , *International Journal of Remote Sensing*, 26(19): 4239-4264.
- Morisette, J.T., J. E. Nickeson, P. Davis, Y. Wang, Y. Tian, C.E. Woodcock, N. Shabanov, M. Hansen, W.B. Cohen, D.R. Oetter, R.E. Kennedy, 2003. High spatial resolution satellite observations for validation of MODIS land products: IKONOS observations acquired under the NASA Scientific Data Purchase, *Remote Sensing of Environment*, 88(1-2):100-110.
- Myneni, R. B., W. Yang, R. R. Nemani, 2007, Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(12), 4820-4923.
- Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Glassy, J., (2002). Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of the Environment*, 83(1-2), 214-231.
- Nightingale, J., Nickeson, J.E., Justice, C.O., Baret, F., Garrigues, S., Wolfe, R., Masuoka, E., 2009, Global validation of EOS land products, lessons learned and future challenges: A MODIS case study 33rd Proc. of the International Symposium on Remote Sensing of Environment, Stresa, Italy.
- Petitcolin, F. and Vermote, E.F., 2002. Land surface reflectance, emissivity and temperatura from MODIS middle and thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 112-134.
- Privette, J.L., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Mukelabai, M., Roberts, G., Tian, Y., Wang, Y. and Leblanc, S.G., 2002. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 232-243.
- Román, M.O., C.B. Schaaf, C.E. Woodcock, A.H. Strahler, X. Yang, R.H. Braswell, P.S. Curtis, K.J. Davis, D. Dragoni, M.L. Goulden, L. Gu, D.Y. Hollinger, T.E. Kolb, T.P. Meyers, J.W. Munger, J.L. Privette, A.D. Richardson, T.B. Wilson, S.C. Wofsy, 2009, The MODIS (Collection V005) BRDF/albedo product: Assessment of spatial representativeness over forested landscapes, *Remote Sensing of Environment*, 113:2476-2498.

- Roy, D.P., J.S. Borak, S. Devadiga, R.E. Wolfe, M. Zheng, J. Desclotres, 2002. The MODIS Land product quality assessment approach, *Remote Sensing of Environment*, 83: 62–76.
- Roy, D.P., Jin, Y., Lewis, P.E., Justice, C.O., 2005, Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data, *Remote Sensing of Environment*, 97:137-162.
- Roy, D.P.; Boschetti, L., 2009, Southern Africa Validation of the MODIS, L3JRC, and Glob-Carbon Burned-Area Products, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(4):1032-1044.
- Running, S. W R., R. R. Nemani, F. A. Heinsch, M. Zhao, M. Reeves, and H. Hashimoto . 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience* 54:547–560.
- Running, S.W., P. E. Thornton, R Nemani, JM Glassy, 2000, *Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System*. Methods in Ecosystem Science. O. Sala, R. Jackson y H. Mooney. New York, Springer Verlag: 44-57.
- Schaaf, C.B., Gao, F., Strahler, A.H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., Strugnell, N.C., Zhang, X., Jin, Y., Muller, J.-P., Lewis, P., Barnsley, M.J., Hobson, P.D., Disney, M., Roberts, G., Dunderdale, M., Doll, C., d’Entremont, R.P., Hug, B., Liang, S., Privette, J.L. and Roy, D.P., 2002. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 135-148.
- Steinberg, D. C. y S. Gotees, 2009, Assessment and extension of the MODIS FPAR products in temperate forests of the eastern United States, *International Journal of Remote Sensing*, 30(1): 169-187.
- Stroeve, J.; Box, J.E.; Gao, F.; Liang, S; Nolin, A.; Schaaf, C., 2005, Accuracy assessment of the MODIS 16-day albedo product for snow: comparisons with Greenland in situ measurements, *Remote Sensing of Environment*, 94(1): 46-60.
- Tanré, D., C. Deroo, P. Duhaut, M. Herman, J.J. Morcrette, J. Perbos y P.Y. Deschamps, 1986. Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S). Laboratoire d’Optique Atmosphérique, Université des Sciences et Techniques de Lille.
- University of Maryland, 2007. User Guide for MOD44A Vegetative Cover Conversion (VCC), <http://glcf.umiacs.umd.edu/pdf/VCCuserguide.pdf>.
- Van Leeuwen, W. J. D., A. R. Huete y T. W. Laing, 1999. MODIS Vegetation Index Compositing approach: a prototype with AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, 69: 264-280.
- Vermote E.F., El Saleous N.Z., Justice C.O., Kaufman Y.J., Privette J., Remer L., Roger J.C., Tanré D., 1997a, Atmospheric correction of visible to middle infrared EOS-MODIS

- data over land surface, background, operational algorithm and validation, *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, d14,17,131-17,141.
- Vermote, E. F., and S. Kotchenova, 2008. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces, *J. Geophys. Res.*, 113, D23S90, doi:10.1029/2007JD009662.
- Vermote, E., C. Justice, F.M. Bréon, 2009. Toward Towards a generalized approach for correction of the BRDF effect in MODIS directional reflectances", *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, 47(3):898-908.
- Vermote, E., El Sallous, N., Justice, C.O., 2002, Atmospheric correction of MODIS data in the visible to near infrared: first results, *Remote Sensing of the Environment*, 83(1-2), 97-111.
- Walthall, C. L., J. M. Norman, J. M. Welles, G. Campbell, and B. L. Blad, 1985. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetation canopies and bare soil surfaces," *Applied Optics*, 24:383-387.
- Wan, Z. and Z.-L. Li, 1997. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4):980-996.
- Wan, Z. and Z.-L. Li, 2008, Radiance-based validation of the MODIS land-surface temperature product, *International Journal of Remote Sensing*, 29: 5373-5395.
- Wan, Z., 2008, "New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products, *Remote Sensing of Environment*, 112: 59-74.
- Wan, Z., Y. Zhang, Q. Zhang, and Z.-L. Li, 2004, Quality assessment and validation of the MODIS land surface temperature", *International Journal of Remote Sensing*, 25: 261-274.
- Wang, X., H. Xie, and T. Liang, 2008. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its applications in northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1497-1513
- Wang, X., H. Xie, T. Liang, X. Huang, 2009. Comparison and Validation of MODIS Standard and New Combination of Terra and Aqua Snow Cover Products in Northern Xinjiang, China. *Hydrological Processes*, 23 (3): 419-429.
- Wang, Y.; Woodcock, C.E.; Buermann, W.; Stenberg, P.; Voipio, P.; Smolander, H.; Häme, T.; Tian, Y.; Hu, J.; Knyazikhin, Y.; Myneni, R.B., 2004, Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland, *Remote Sensing of Environment*, 91(1):114-127
- Wu, W., R. Shibasaki, P. Yang, L. Ongaro, Q. Zhou, H. Tang Validation and comparison of 1 km global land cover products in China, 2008. *International Journal of Remote Sensing*, 29(13): 3769-3785.

- Zhan, X., R.A. Sohlberg, J.R.G. Townshend, C. DiMiceli, M.L. Carroll, J.C. Eastman, M.C. Hansen, R.S. DeFries, 2002, Detection of land cover changes using MODIS 250 m data, *Remote Sensing of Environment*, 83: 336-350.
- Zhang XY, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH, Hodges JCF, Gao F, Reed BC, Huete A, 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 84 (3): 471-475.

CAPÍTULO 3

Herramientas de análisis de los datos MODIS

Gerardo López Saldaña, René Colditz, María Isabel Cruz López,
Rainer Ressler, Jean-François Mas

RESUMEN

El gran éxito del sistema de observación de la Tierra (EOS por sus siglas en inglés), del cual MODIS forma parte, se basa en la calidad para el uso científico de los datos y el acceso libre a estos en distintos niveles de procesamiento. Sin embargo, esto por sí mismo no es suficiente para asegurar que los datos del sensor MODIS sean ampliamente usados, no solo por la comunidad científica sino, además, por proveedores de servicios en forma operacional, como los servicios meteorológicos y de monitoreo del medio ambiente.

Otro punto clave son las herramientas desarrolladas para facilitar el uso y la explotación de los datos. Dichas herramientas han sido desarrolladas para cubrir un amplio rango de necesidades, desde el procesamiento de datos recibidos en una estación de recepción, hasta la extracción de datos de productos de nivel agregado, incluyendo reproyección, creación de mosaicos y visualización de datos. Además de las herramientas desarrolladas específicamente para los datos y productos derivados del sensor MODIS, existen una gran variedad de instrumentos de propósito general para datos en formato HDF, que se describen en este texto, así como programas específicos para la generación y análisis de series de tiempo.

El acceso libre a los datos de distintos niveles de procesamiento en diferentes portales de distribución permite que cualquier usuario pueda acceder, en algunos

casos casi en tiempo real, los datos y productos de valor agregado, diferentes portales y sitios son descritos dependiendo de las aplicaciones en las cuales se usará la información.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los datos del sensor MODIS de los satélites Terra y Aqua han sido ampliamente utilizados por la comunidad científica a partir del lanzamiento de los satélites. La gran aceptación y el éxito del Sistema de Observación de la Tierra (EOS por sus siglas en inglés) del cual MODIS forma parte, están basados en la calidad de los datos proporcionados, los productos derivados, el acceso gratuito a los datos y por las herramientas disponibles para la evaluación y utilización de la información. La meta del programa MODIS de la NASA no era solamente proveer datos científicos a los usuarios pero también la generación de información de valor agregado (productos de niveles más altos) y el desarrollo de las herramientas para facilitar el uso de los datos y asegurar la explotación amplia de la información. Muchas de las herramientas existentes fueron desarrolladas por la NASA en conjunto con universidades involucradas en el programa, por ejemplo, las universidades de Maryland y de Wisconsin (e.g., IMAPP). Además, muchas herramientas se desarrollaron por parte de instituciones independientes utilizando la información de MODIS en sus proyectos científicos o comerciales. Las herramientas hoy en día han crecido a un número considerable y cubren todas las necesidades desde la recepción de los datos crudos hasta el análisis y distribución de la información. La mayoría de las herramientas disponibles están accesibles en forma gratuita principalmente a través de los portales de la NASA y de varios sitios gubernamentales (e.g., el USGS) y de las páginas web de los usuarios y universidades. Además existen varios desarrollos de empresas privadas que proporcionan herramientas en forma comercial, muchas veces paquetes completos, los cuales cubren desde la recepción de los datos hasta la generación de productos y el análisis de la información.

Las herramientas para el mejor aprovechamiento de la información derivada de MODIS en los satélites Terra y Aqua se pueden agrupar entre los desarrollos para usuarios directos de los datos y aquellos usuarios, que cuentan con una estación de recepción directa del señal satelital (denominados usuarios "Direct Readout"). El último grupo es más pequeño pero no menos importante porque en muchos casos están utilizando la información en varias aplicaciones casi en tiempo real (p. ej., detección y monitoreo de incendios). Por lo tanto los requerimientos según

disponibilidad de datos y de las herramientas son diferentes y la NASA proporciona un sitio especial (DRL – Direct Readout Lab) para estos usuarios.

Las herramientas existentes se pueden agrupar entre los paquetes de software y algoritmos para la recepción de la información cruda, en caso de los usuarios de recepción directa, el procesamiento de los datos para la calibración, georreferenciación y re-proyección y para la generación de los productos de diferentes niveles (e.g., L1A hasta L4), el análisis de la información, la visualización de los datos y finalmente herramientas para la distribución de los datos.

Este capítulo proporciona una visión general de las herramientas existentes para el manejo de datos MODIS. El enfoque está en las herramientas frecuentemente utilizadas y cabe destacar que no tiene la pretensión de ser exhaustivo.

DISPONIBILIDAD DE DATOS MODIS

MODIS es uno de los cinco instrumentos a bordo del satélite Terra (EOS AM) y uno más de los seis a bordo del satélite Aqua (EOS PM) que forman parte del programa EOS.

Los datos adquiridos por cada uno de estos sensores deben ser enviados del satélite a la Tierra para su posterior procesamiento, en el caso de MODIS, existen dos modalidades para obtener dichos datos, 1) transmisión programada: los datos son colectados en la plataforma y almacenados a bordo hasta que el satélite pasa sobre una estación de recepción habilitada para recibir estos datos, los cuales se transmiten en un gran bloque de información. Lo anterior evita la pérdida de datos cuando la plataforma está fuera de la vista de cualquier estación terrena, por ejemplo cuando ésta se encuentra sobre el océano. Y 2) transmisión directa (Direct Broadcast, DB por sus siglas en inglés): los datos se envían en tiempo real desde el satélite a la Tierra a una estación de recepción habilitada para recibir en forma directa (Direct Readout, DR por sus siglas en inglés). Tanto Terra como Aqua transmiten en forma omni direccional los datos a la Tierra de forma continua.

Recepción de datos en forma directa (DB/DR)

Para poder recibir los datos enviados en forma directa es necesario contar con equipo de comunicaciones, cómputo y software especializados. Cuando el satélite se encuentre en el círculo de recepción de la estación terrena como lo muestra la

el movimiento de los satélites en su órbita. Éstos son actualizados diariamente para calcular el momento exacto cuando un satélite pasará dentro del círculo de recepción de la estación.

Portales de distribución

Existen diversos portales a través de los cuales es posible descargar productos MODIS de acuerdo a la disciplina de interés y el nivel de procesamiento deseado, los niveles de procesamiento son descritos a detalle en el capítulo 1. Básicamente se pueden dividir acorde a: 1) productos de diversas disciplinas, 2) productos terrestres, 3) productos oceánicos, atmosféricos y criosféricos.

Portales que ofrecen productos de diversas disciplinas

Una vez que los datos MODIS estuvieron disponibles al público en general, el principal portal proveedor de datos MODIS fue el LP DAAC EOS Data Gateway (EDG); sin embargo, el Warehouse Inventory Search Tool (WIST) <https://wist.echo.nasa.gov> a partir de octubre de 2008 es el principal portal de distribución de datos de observación de la Tierra de NASA.

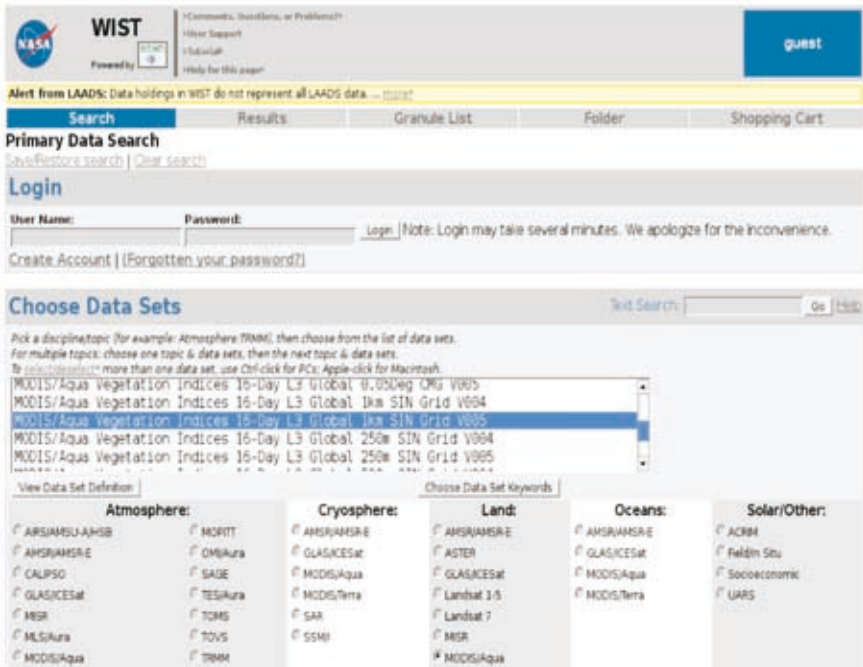
WIST cuenta con datos disponibles organizados por 1) disciplina: atmósfera, criósfera, tierra, océanos, entre otros, o 2) categoría y/o atributos, por ejemplo: instrumento, calibración, cantidad de nubes, ángulos de observación, etc.

Respecto a los datos MODIS es posible descargar información tanto de MODIS-Terra como de MODIS-Aqua en niveles L1A, L1B, L2, L2G, L3 y L4.

El proceso de descarga para el modo de disciplina en WIST se puede dividir en los siguientes pasos:

- 1) Seleccionar el conjunto de datos a descargar como se muestra en la figura 3.
- 2) Una vez seleccionado el o los productos a descargar, es necesario elegir el área geográfica deseada y el intervalo de tiempo requerido. Cuando se tienen todos los parámetros de búsqueda el usuario debe seleccionar el botón "Start Search" para iniciar la búsqueda como se muestra en la figura 4.
- 3) Una vez que WIST muestra los archivos a descargar es necesario seleccionar el tipo de entrega, en algún medio físico como discos DVD o cintas, con un costo adicional, o vía un servidor de transferencia de datos (FTP, por sus siglas en inglés) en el cual el usuario puede descargar los datos, se recomienda al usuario crear una

FIGURA 2. SELECCIÓN DE PRODUCTOS MODIS A DESCARGAR EN EL PORTAL WIST



cuenta de acceso para guardar preferencias de búsqueda y evitar el llenado de formularios de identificación cada vez que se desee descargar información.

Portales con enfoque en productos terrestres

El “Land Processes Distributed Active Archive Center” (LP DAAC) se estableció como parte del sistema de información y datos del programa de observación de la tierra (EOSDIS por sus siglas en inglés) para procesar y distribuir productos relacionados a diversos procesos terrestres (LP DAAC 2009). En este portal es posible descargar los productos terrestres MODIS directamente de un servidor FTP con una estructura de directorios organizados por producto y fecha, posteriormente se debe localizar el tile a descargar. Sitio web: <http://lpdaac.usgs.gov>, conforme a la localización del área de interés (como se ve en la figura 4).

Adicionalmente el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) tiene disponible diversos productos terrestres MODIS (Glovis 2009a, Glovis 2009b), uti-

FIGURA 3. SELECCIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA E INTERVALO DE TIEMPO DESEADOS PARA DESCARGAR PRODUCTOS MODIS EN EL PORTAL WIST

Choose Search Area

Click & hold, then drag on the map to select a search region - or - enter upper left & lower right corners and then click on Update Lat/Lon Corners on Map

Clear

Grid size: 20"

Features:

- Places
- Roads
- Rail
- Rivers
- Political

Zoom: 4x

(Single click on map to pan)

Lat and Long must be in decimal degrees.

You must click on "Update Lat/Lon Corners on Map" if you type in coordinates.

upper left	* Lat	upper right
24.8334		24.8334
-103.8180	* Lon	98.7523
center		
24.8334	* Lat	18.2974
-103.8180	* Lon	98.7523
lower left		lower right

Update Lat/Lon Corners on Map

Global Search
 Stereographic N-pole
 Type in Lat/Lon Point
 Equatorial
 Stereographic S-pole
 X/Y Coordinate Range
 Orthographic
 Global granules only
 Orbit Search

Choose a Date/Time Range (not required)

Date format: YYYYMM-DD (1967-05-25) or MMDD(YYYY) (05/25/1967)
 Time format: HH:MM (14:30) or HH:MM:SS (14:30:01)

You may also enter a date without a time or a start date without an end date. Use the help link for information on default values.

Start date: 2008-09-01 Time (UTC):
 End date: 2008-09-30 Time (UTC):

Clear Time Fields

Standard Date Range
 Julian Date Range
 Annually Repeating

Choose Additional Options (not required)

- Return a maximum of 100 data granules per data set (Range: 0 - 1000).
- Only return data granules which have browse products.
- Only display collections which have browse products.
- Allow searches to run for a maximum of 90 minute(s)
- Return DEFAULT metadata in search results: [Customize](#)
- Only return data granules which were retrieved during the Day/Night
- Name this query: (will be used in creating a file name when saving the query)

Start Search

liza una herramienta llamada GloVis (Global Visualization Viewer) [http://http://glovis.usgs.gov](http://glovis.usgs.gov) para la distribución de los datos.

El "Global Land Cover Facility" (GLCF por sus siglas en inglés) proporciona productos nivel L3 y L4: Vegetation Continuous Fields (VCF por sus siglas en inglés) y una versión modificada del Vegetative Cover Conversion (VCC). Sitio web: <http://glcf.umiacs.umd.edu>.

Todos los productos en LP DAAC y GloVis son un subconjunto de los datos en WIST, para el caso del GLCF es el único portal donde es posible descargar los productos antes mencionados.

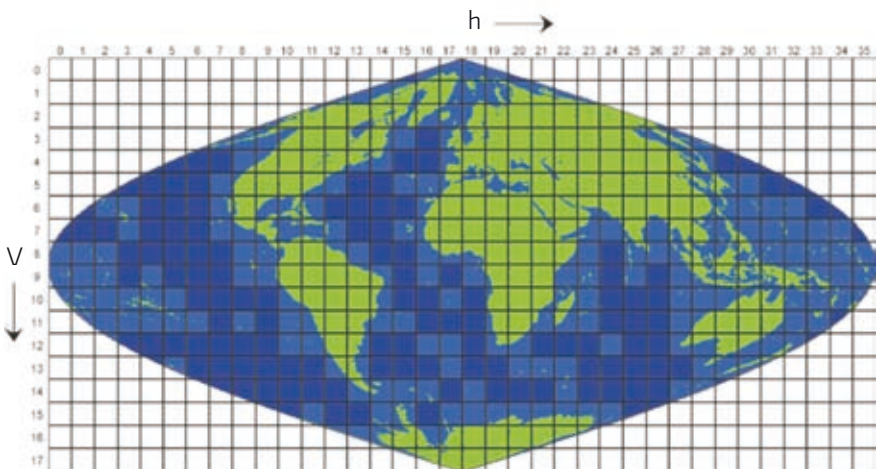
Portales con mayor enfoque en productos oceánicos, atmosféricos y criosféricos

Otro portal de distribución que permite la descarga de datos MODIS es el Ocean Color Web site: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> que provee datos desde nivel L0 hasta nivel L3. Los productos nivel L2 y L3 únicamente están disponibles para la disciplina de océanos.

El sitio web “Level 1 and Atmosphere Products” (LAADS por sus siglas en inglés) tiene accesibles productos MODIS por: gránulos para los productos nivel L0, L1A, L1B y L2 y grids de igual área en coordenadas geográficas con resolución espacial de un grado para los productos nivel L3. Es posible descargar los datos mediante un servidor FTP, una interfase web u ordenar ciertos productos con un post-procesamiento como cambio de formato o reproyección. LAADS además distribuye tiles en coordenadas geográficas. Sitio web: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov>.

El National Snow and Ice Center (NSIDC por sus siglas en inglés) cuenta con diversos productos relacionados con la cobertura de hielo y nieve en gránulos y tiles,

FIGURA 4. REJILLA GLOBAL UTILIZADA PARA LA DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS DERIVADOS DEL SENSOR MODIS



estos formatos se describen en el capítulo 1. Es necesario seleccionar el producto a descargar, fecha y cobertura geográfica y posteriormente descargar el producto vía un servidor de transferencia de datos (ftp). Además NSIDC ofrece la descarga de datos por suscripción, en la cual, el usuario recibirá los datos más recientes de su selección cuando estos estén disponibles. Sitio web: <http://nsidc.org>.

Además de los portales antes mencionados con un enfoque en la distribución de datos globales, en el caso específico de México, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) distribuye a través de su portal web el nivel L1B de todas las imágenes diurnas recibidas en su estación de recepción desde Julio de 2004. El usuario puede descargar las imágenes una hora después de la recepción. Las imágenes están en formato genérico binario y recortadas para cubrir todo México y proyectadas a la proyección cartográfica cónica conforme de Lambert. Sitio web: <http://www.conabio.gob.mx>.

La tabla 1 muestra una sinopsis de los diferentes sitios web donde los datos MODIS se pueden obtener.

PROCESAMIENTO

Pre-procesamiento de los datos de recepción directa

La capacidad de transmisión directa de los satélites Terra y Aqua permite la generación de datos en tiempo real. Las siguientes aplicaciones se pueden usar para procesar los datos recibidos en tiempo real o bien para reprocesar

TABLA 1. SINOPSIS DE LOS SITIOS WEB DONDE LOS DATOS MODIS SE ENCUENTRAN DISPONIBLES

Portal	Disciplinas	Niveles de procesamiento	Formato espacial
WIST	Atmósfera Criósfera Tierra Océano	L1A, L1B, L2, L2G, L3, L4	Gránulos, Tiles
LP DAAC	Tierra	L2, L2G, L3	Gránulos, Tiles
GloVis	Tierra	L2, L3, L4	Tiles
GLCF	Tierra	L3, L4	Tiles
Ocean Color web	Océano Atmósfera	L0, L1A, L2, L2G, L3	Gránulos, Tiles
LAADS	Atmósfera	L0, L1A, L2, L3	Tiles
NSIDC	Criósfera	L2, L2G, L3	Tiles

datos usando algoritmos adecuados o modificados acorde a las necesidades del usuario.

International MODIS/AIRS Processing Package (IMAPP)

IMAPP es desarrollado en el Space Science and Engineering Center (SSEC) en la Universidad de Wisconsin-Madison. La principal característica de IMAPP es su portabilidad ya que es posible ejecutarlo en prácticamente cualquier plataforma Linux que use el compilador gcc versión 3.2.1 del lenguaje de programación C.

IMAPP permite generar los siguientes productos a partir de datos nivel LO:

- MODIS Level 2 geophysical products (Terra and Aqua)
- MODIS cloud mask (MOD35)
- MODIS cloud top properties (MOD06CT)
- MODIS atmospheric profiles, precipitable water and stability indices (MOD07)
- MODIS aerosol product (MOD04)
- MODIS Sea Surface Temperatures (product IMAPP)
- MODIS Near Infrared Water Vapor product (producto IMAPP)
- Sitio web: <http://cimss.ssec.wisc.edu/imapp>.

SEAWiFS DATA ANALYSIS SYSTEM (SEADAS)

SeaDAS es un conjunto de herramientas para procesar, analizar, visualizar productos MODIS y principalmente aplicar controles de calidad a productos oceánicos. Originalmente fue diseñado para procesar datos del sensor SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor), además es posible procesar datos de los sensores OCTS (Ocean Color and Temperature Sensor) y CZCS (Coastal Zone Color Scanner).

Las capacidades de SeaDAS para procesar datos MODIS son:

- Procesamiento de nivel LO a L1A de datos de recepción directa
- Geolocalización de datos nivel L1A
- Extracción de una subescena de datos nivel L1A
- Procesamiento nivel L1A a L1B
- Únicamente productos oceánicos:

- o Procesamiento de nivel L1B a L2
- o Herramientas de análisis para datos nivel L2 y L3 como álgebra de bandas, generación de diagramas de dispersión y generación de compuestos.
- o Reproyección y exportación a diversos formatos

Sitio web:<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas>.

Scientific Package Application (SPA)

El “Direct Readout” (DRL) es un grupo de trabajo de la NASA y parte de sus funciones es crear una interfaz entre los grupos de trabajo científico a cargo de generar los productos estándar de MODIS y las estaciones de recepción, de tal forma que acorde a las posibilidades se puedan generar productos en dichas estaciones que sean homogéneos y comparables con los productos estándar.

Las aplicaciones desarrolladas por el DRL se encuentran encapsuladas en un contenedor de Java (wrapper por su nombre en inglés) llamado Scientific Package Application (SPA). Los SPA que se pueden descargar en el DRL son:

- MODISL1DB_SPA: procesamiento de nivel L0 a nivel L1B
- MOD09_SPA: Reflectancia de la superficie con corrección atmosférica incluyendo corrección por aerosoles,
- CREFL_SPA: Reflectancia de la superficie con corrección atmosférica básica,
- NDVIEVI_SPA: índices de vegetación NDVI y EVI derivados de los datos de salida del CREFL_SPA.
- MOD14_SPA: Incendios activos/anomalías térmicas,
- MODLST_SPA: temperatura superficial de la superficie terrestre,

Además el DRL desarrolla herramientas de visualización como SIMULCAST que permite visualizar en casi tiempo real la recepción de datos MODIS de diferentes estaciones de recepción. Sitio web: <http://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov>.

Conversiones geométricas

MODIS Reprojection Tool (MRT/MRTSwath)

El MODIS Reprojection Tool es una herramienta desarrollada por el Centro de Archivos Activos Distribuidos (Distributed Active Archive Center, DAAC) en el Centro de Ciencia y Observación de los Recursos Terrestres (Earth Resources Observation and Science, EROS, Center) del Servicio Geológico de los Estados Unidos y la Escuela de Minas y Tecnología de Dakota del Sur (SDSM&T). La herramienta está desarrollada para diversas plataformas y Sistemas Operativos: Windows 2000/ME/XP, Windows NT, Linux, 64-bit Linux, Sun/Solaris, SGI/Irix y Mac OS.

Las funcionalidades principales de MRT se pueden agrupar en: reproyección, remuestreo, conversiones de formato y creación de mosaicos. Estas funciones se pueden aplicar a datos MODIS en formato HDF-EOS que se explica en el capítulo 1.

- Reproyección de productos MODIS (niveles L2G, L3 y L4) a 14 proyecciones estándar, se puede realizar un número acotado de conversiones de datum; si el usuario lo desea es posible únicamente reproyectar porciones de la imagen (subconjunto espacial de datos) por: 1) latitud/longitud, 2) línea/columna y 3) encajonando los datos de salida según límites establecidos en las coordenadas de salida seleccionadas. Además se pueden reproyectar solo bandas específicas de una imagen (subconjunto espectral).
- Remuestreo de datos, puede ser realizado utilizando las siguientes técnicas de remuestreo: vecino más cercano, bilineal y convolución cúbica.
- Conversión de formato, es posible realizar una conversión de formato, por ejemplo de HDF-EOS a genérico binario, sin reproyectar los datos.
- Creación de mosaicos, es posible seleccionar varios tiles y el mosaico se realizará de forma automática generando un único archivo de salida, con o sin el proceso de reproyección, primeramente se realiza el mosaico y posteriormente la reproyección.

Estas operaciones se llevan a cabo mediante dos programas: “resample” y “mrt-mosaic” que pueden invocarse como un comando en línea o usando una interfaz gráfica que permite seleccionar la imagen de entrada, las bandas seleccionadas, las coordenadas del corte, la proyección, el datum y formato de la imagen de salida.

Para procesar un gran número de imágenes, es más eficiente usar el modo de comandos en línea y con la ayuda de scripts; al ejecutar “resample” o “mrtmosaic” sin ningún parámetro se desplegará la forma de uso e información general relativa al comando. Una de las formas más sencillas es trabajar con MRT desde la línea de comandos es guardar en un archivo los parámetros definidos en el entorno gráfico y posteriormente ejecutar el comando correspondiente.

En su versión actual (4.1) el MRT no procesa datos obtenidos con la herramienta LDOPE, aspecto que será explicado más adelante en este capítulo, ya que esta última produce archivos HDF y el MRT requiere de datos en HDF-EOS.

El MRT Swath tiene básicamente las mismas capacidades que el MRT, sin embargo está enfocado al manejo de datos swath y gránulos, además es necesario tener el archivo MODO3 correspondiente que contiene toda la información de geolocalización del swath o gránulo a proyectar. El comando a usar en el modo de comando en línea es “swat2grid”. Un punto a considerar es que MRTSwath no soporta datos de 32 bits.

Sitio web de MRT: <http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp>.

Sitio web de MRTSwath: <http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/mrtswath>.

Data Pool HDFEOS-to-GeoTiff (HEG)

HEG es una herramienta que permite 1) cambiar de formato, 2) reproyectar a siete diferentes proyecciones y 3) recortar espacialmente los datos distribuidos a través de WIST. HEG tiene básicamente la misma funcionalidad que MRT, pero adicionalmente HEG puede trabajar con datos del sensor ASTER. Sitio web: http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/heg/heg_announce.asp.

MODIS Swath-to-Grid (MS2GT)

El grupo de herramientas MODIS Swath-to-Grid Toolbox (MS2GT) es un conjunto de herramientas de software que pueden leer imágenes MODIS swath en formato HDF-EOS. Genera archivos binarios proyectados usando 10 diferentes proyecciones cartográficas, adicionalmente MS2GT puede obtener la información de geolocalización del producto MODO3. Sitio web: <http://nsidc.org/data/modis/ms2gt>.

Geospatial Data Abstraction Library (GDAL)

GDAL es un conjunto de librerías de software para la lectura/escritura de diversos formatos de datos geoespaciales (GDAL 2009). En conjunto con PROJ4, que es una librería de software para el manejo de proyecciones cartográficas, se puede procesar y reproyectar datos MODIS en formato HDF-EOS. Las tareas más comunes que se pueden realizar son: creación de mosaicos de múltiples tiles, reproyección, cambio de formato de HDF-EOS a los formatos soportados por GDAL. Únicamente es posible utilizar esta herramienta con los datos proyectados basados en tiles.

Los comandos más útiles disponibles en línea de comandos son: 1) `gdalinfo`, proporciona información básica como proyección geográfica, número de líneas y columnas, número de bandas, etc., 2) `gdalwarp`, reproyecta el archivo de entrada en diversas proyecciones cartográficas, 3) `gdal_merge.py`, crea un mosaico de un conjunto de imágenes. Sitio web: <http://www.gdal.org>.

La tabla 2 contiene un resumen de las aplicaciones para conversiones geométricas.

TABLA 2. APLICACIONES PARA CONVERSIONES GEOMÉTRICAS DE DATOS MODIS

Aplicación	Swath/ Gránulos/Tiles	Formatos de entrada	Formatos de salida	Interfaz
MRT	Tiles	HDF-EOS Binario	HDF-EOS, GeoTIFF, binario	IGU/LC
MRT Swath	Swath, gránulos	HDF-EOS	HDF-EOS, GeoTIFF, binario	IGU/LC
HEG	Tiles	HDF-EOS	HDF-EOS, GeoTIFF, binario	IGU/LC
MS2GT	Swath, gránulos	HDF-EOS	Binario	LC
GDAL/ PROJ4	Tiles	HDF-EOS	Formatos soporta- dos por GDAL	LC

Nota: IGU: Interfaz gráfica del usuario. LC: Línea de comandos.

Visualización y análisis básico

Land Data Operational Product Evaluation (LDOPE)

El grupo de trabajo científico de productos terrestres (MODLAND) fue fundado por la NASA para desarrollar algoritmos científicos y herramientas de software para generar los productos terrestres derivados de MODIS. Como parte de las actividades de LDOPE se desarrollaron herramientas para la manipulación, visualización y análisis de los productos terrestres MODIS. Las herramientas están desarrolladas en lenguaje C o ENVI/IDL y pueden ser ejecutadas desde la línea de comandos o desde un script.

Este conjunto de herramientas fue liberado en 2002 (Roy et al., 2002), la última actualización es de Abril de 2004, esta versión cuenta con soporte para los siguientes sistemas operativos: Linux, Irix, Solaris y Windows usando Cygwin.

LDOPE es particularmente útil para leer la información de la capa de información sobre calidad (QA) ya que permite, utilizando el comando sds2bin, extraer un rango determinado de bits y transformarlos en una imagen binaria. Por ejemplo en el QA de los índices de vegetación, un índice general de calidad de los datos está codificado de los bits 2 a 5. LDOPE permite la creación de una imagen con valores de 0 a 15 que represente la calidad.

El manual del usuario presenta una descripción de cada instrucción disponible, así como la sintaxis, parámetros y ejemplos de uso. Sitio web: <http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/ldope/index.asp>.

HDF-Look / Msphinx

HDFLook es una herramienta de software para el procesamiento y visualización desarrollada para trabajar con productos MODIS de diversas disciplinas, datos terrestres, oceánicos y atmosféricos (Gonzalez et al., 2006). Sus características incluyen (1) visualización de todos los productos MODIS nivel L1 y L2 en swath y productos nivel L3 y L4 en grid, (2) reproyección de datos swath a diversas proyecciones cartográficas, (3) conversión de proyecciones, (4) capacidades de procesamiento interactivo de imágenes en formato HDF a través de una interfaz del usuario y línea de comandos, (5) recorte de imágenes y procesamiento de múltiples tiles y (6) conversión de datos de HDF-EOS a ASCII, binario, JPEG y GeoTIFF.

HDFLook fue desarrollado para funcionar en un ambiente XWindows y ha sido probado en diversas plataformas UNIX, Linux, Mac OS. Los usuarios que quieran ejecutar HDFLook bajo Windows deben primeramente: instalar y configurar Cygwin, que es un emulador de Linux en Windows y posteriormente instalar HDF Look.

Una herramienta que complementa HDF Look es Motif Satellite Process Handling Images uNder Xwindow (Msphinx) que utiliza HDF Look como su interfaz de entrada, sus funcionalidades principales incluyen: análisis de imágenes, generación de gráficas de datos, conversión de formatos y herramientas de impresión.

Es posible procesar datos usando Msphinx en conjunto con programas desarrollados por el usuario en lenguaje C o Fortran. Sitio web: http://www-loa.univ-lille1.fr/Hdflook/hdflook_gb.html.

HDFExplorer y HDFView

HDFExplorer es un programa para visualizar datos, por lo cual permite leer archivos en formato HDF, HDF-EOS y HDF5. HDF Explorer ofrece una interfaz para que el usuario pueda visualizar primero la estructura interna del archivo y posteriormente exportarlos en diversos formatos como archivos de texto o imágenes en mapas de bits. Dado que la estructura interna de los datos MODIS en formato HDF-EOS resulta muy extensa, esta herramienta permite navegar a través de toda la estructura de datos y metadatos e incluso mostrar los valores como imágenes.

HDF-Explorer únicamente se puede ejecutar bajo plataformas Windows y solo se puede utilizar mediante una interfaz gráfica.

Sitio web: <http://www.space-research.org/explorer.htm>

HDFView es una herramienta de características muy similares a HDFExplorer, permite visualizar, navegar y editar archivos en formato HDF4 y HDF5, es posible ver la jerarquía interna de un archivo en una estructura de árbol, crear nuevos archivos, agregar o borrar grupos o "datasets", modificar el contenido de un "dataset", agregar y modificar atributos.

La diferencia principal entre estas dos herramientas es que HDFView permite la creación y edición de los datos, función que no es posible realizar en HDFExplorer.

HDF-View debido a que se encuentra desarrollado en Java puede ser ejecutado en diversas plataformas como: Windows, Solaris, Linux y Mac OS. Sitio web: <http://www.hdfgroup.org/hdf-java-html/hdfview/index.html>.

ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

La alta resolución temporal del sensor MODIS permite la generación de series de tiempo debido a que es posible observar cualquier parte de la Tierra diariamente. En las siguientes tres secciones se explica algunas herramientas seleccionadas útiles para generar series de tiempo con los datos del sensor MODIS. Una vista general sobre grupos de métodos para generar series de tiempo con datos de satélites está incluido en Colditz et al. (2008). En la cuarta sección se presentan herramientas particularmente diseñadas para analizar series de tiempos con datos satelitales, aunque es posible utilizar otros programas de estadística que incluyen módulos para analizar series de tiempo.

Timesat

Es una aplicación con código abierto para generar series de tiempo, particularmente para los índices de la vegetación (Jönsson y Eklundh 2004). Además del código en Fortran 90 la aplicación incluye un interfaz gráfica para Matlab. Este programa es de libre acceso en internet (Timesat 2008).

Timesat contiene tres métodos para corregir los datos; un filtro local que utiliza funciones de los polinomios, que podrían ser clasificados como un filtro adaptativo de Savitzky-Golay. Los otros métodos, técnicas de análisis armónico y funciones de Gauss asimétrica, son aplicados a toda la serie de tiempo o un ciclo completo, respectivamente.

La aplicación incluye datos adicionales como indicadores de la presencia de nubes. Las técnicas empleadas tienen como base la presunción que la máxima intensidad de la señal es válida para índices de vegetación. El número de ciclos está determinado por un modelo que compara la fracción de la segunda amplitud máxima con la primera.

Además de la generación de series de tiempo corregidas, Timesat genera indicadores de la fenología para cada ciclo en tiempo e intensidad (Jönsson y Eklundh 2002, Jönsson y Eklundh 2004). Los parámetros del tiempo indican el principio, la cresta y el final del ciclo, duración de crecimiento y una estimación del final de crecimiento y el principio del decrecimiento. Los parámetros de la intensidad son proporcionados por el valor de la cresta y la amplitud, mientras para cada estación la integral, y la asimetría de la curva.

HANTS

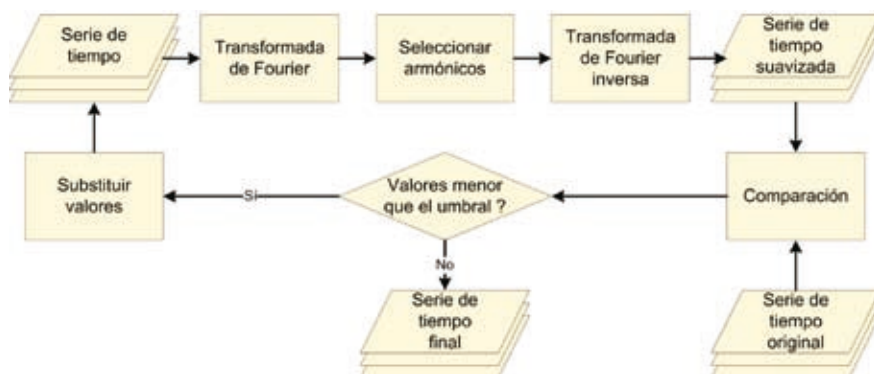
El análisis armónico de las series de tiempo (harmonic analysis of time series, HANTS, por sus siglas en inglés) es un método para generar, corregir y suavizar series de tiempo (Roerink et al. 2000). Este método sirve particularmente para los productos de índices de vegetación, porque también presupone que la máxima señal es un valor válido en los índices.

El código está disponible libre para ENVI y IDL (HANTS 2008a) y para Fortran (HANTS 2008b).

El algoritmo parte de la idea que el desarrollo de la vegetación es estacional, excepto en las regiones tropicales. Matemáticamente este desarrollo se puede describir con funciones de baja frecuencia del seno con diferentes fases y amplitudes de las ondas. La suposición es que el ruido, generado entre otros elementos por nubes o sombras, está distribuido aleatoriamente y es representado por frecuencias altas. Por lo anterior el algoritmo está basado en el análisis de Fourier.

A diferencia de la transformada de Fourier en general, Hants está utilizando una forma iterativa (Figura 5). La transformación inversa sólo está usando algunas frecuencias, normalmente frecuencias: unimodal, bimodal y trimodal durante un año. Posteriormente esta serie de tiempo suavizada es comparada con la serie original. Si los valores son menores que el umbral especificado por el usuario, se substituyen el valor original por filtrado. Sin embargo, el proceso se tiene que repetir porque el promedio de la serie cambió. El algoritmo termina cuando no hay substitucio-

FIGURA 5. PROCESAMIENTO DE HANTS



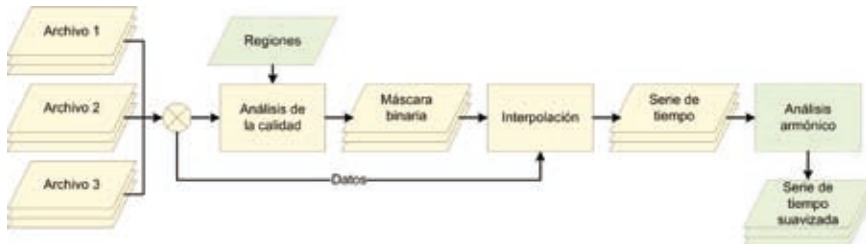
nes significativas de los valores. Para ejecutar Hants es necesario especificar cinco parámetros obligatorios: la tolerancia entre la transformada inversa y los valores del índice, las frecuencias que deberían ser seleccionadas de la transformación de Fourier inversa, el margen de los valores validos (mínimo y máximo), el máximo de observaciones de NDVIs que puede desechar y el máximo número de iteraciones, adicionalmente es necesario incluir una máscara de tierra/agua para procesar únicamente pixeles que se encuentren sobre la Tierra.

TiSeG

El generador de series de tiempo (Time Series Generator, TiSeG, por sus siglas en inglés) construye series de tiempo utilizando datos adicionales como estimaciones de la calidad (Colditz 2008a, Colditz et al. 2008b). La implementación actual funciona solamente para productos terrestres de los niveles 2G, 3 y 4 del sensor MODIS. Una gran diferencia respecto a Timesat y Hants es que TiSeG está diseñado para procesar cualquier producto, no sólo los índices de la vegetación, porque no trabaja con la presunción de las características de la curva antes del análisis. La aplicación corre con la maquina virtual de IDL (IDL-VM) y está disponible libremente (TiSeG 2008).

El proceso básico del TiSeG (Figura 6) es interactivo, empleando datos de la calidad a nivel de pixel, que viene en cada imagen o compuesto (quality assessment science data set, QA-SDS, por los siglas en inglés). TiSeG analiza los datos de calidad y genera dos índices sobre la disponibilidad de datos, el primero indica el número de pixeles validos, y el segundo el vacío máximo sin datos válidos. El último índice es importante para evaluar el periodo máximo que se tiene que interpolar. Ambos índices se pueden visualizar en forma espacial y temporal. El usuario

FIGURA 6. EL PROCESO DE TiSeG. EN VERDE SE INDICAN DATOS Y PROCESOS OPCIONALES



puede aplicar y visualizar ejemplos de la interpolación temporal para píxeles, grupos y estratos. También se puede cambiar las especificaciones temporales para observar cambios estacionales y espaciales para regiones específicas. El resultado es una máscara binaria que indica si el valor es válido o inválido y posteriormente se sustituyen los datos inválidos por un valor fijo o interpolado, utilizando técnicas temporales y espaciales.

La aplicación de TiSeG usa algoritmos genéricos para realizar la interpolación temporal, estos son: spline, lineal, o funciones polinomiales. En la figura 6 se observa el proceso general que realiza TiSeG. Más detalle sobre el proceso y un ejemplo se puede obtener en Colditz et al. (2008b).

Recientemente, TiSeG se ha ampliado para generar series de tiempo automáticamente. Este proceso usa una categorización de la calidad. El usuario sólo especifica el máximo de vacíos para cada nivel de la calidad. Este proceso iterativo ha sido implementado para los productos de NDVI y EVI generados con los datos de MODIS, pero es posible aplicarlo para otros datos y sensores (Colditz et al. 2011).

Adicionalmente, TiSeG contiene una opción para análisis armónico. Este proceso permite generar curvas suavizadas necesarias para modelos o caracterizaciones estacionales. El usuario selecciona el número de armónicos máximos y un porcentaje máximo de la variancia explicada para terminar el proceso de la transformación. Además de las curvas nuevas suavizadas los resultados contienen el número del armónico y el porcentaje de la variancia explicada suficiente para la transformación y opcionalmente la fase, la amplitud y la variancia explicada para cada armónico.

TimeStats

TimeStats es una aplicación que incluye funciones para analizar series de tiempo que se puede encontrar en muchos paquetes generales de estadística. La ventaja de esta aplicación es la selección de los algoritmos más usados para datos satelitales y su funcionamiento directamente con ENVI (Udelhoven 2006). El programa está disponible sin costo (TimeStats 2008).

La aplicación contiene diferentes módulos para leer, guardar, pre-procesar, realizar análisis básicos y de tendencias, regresión múltiple en forma lineal y no lineal, así como el análisis de las frecuencias. El proceso de limpieza incluye la detección y corrección de valores anómalos y filtros para eliminar el ruido en los datos. El módulo de pre-procesamiento contiene opciones para generar compuestos, analizar anomalías, calcular estadísticas globales y estacionales, agregar datos y modelaje. Las estadísti-

cas básicas y tendencias calculan varias pruebas de significancia. La regresión puede ser ejecutada en varias formas, por ejemplo en modo del desplazamiento (distributed lags models) o en regresión múltiple sin o con limitación. Los modelos de las frecuencias incluyen la auto-correlación, análisis de wavelets y cross-spectral analysis.

CONCLUSIONES

En la actualidad existen diversas aplicaciones para el procesamiento y análisis de los datos MODIS, en forma libre en internet, estas aplicaciones tienen diferentes objetivos y formas de operar. Existe un amplio espectro de aplicaciones desde los enfocados al procesamiento de los datos crudos nivel LO, hasta aquellos que son útiles para el análisis multitemporal, pasando por aquellos que permiten preparar los datos para su posterior análisis.

En la tabla 3 se muestran a manera de resumen las aplicaciones descritas en el presente capítulo con el objetivo de dar una vista rápida de las opciones más comunes.

REFERENCIAS

- Colditz, R.R., 2008a. Time series generation and classification of MODIS data for land cover mapping. Dissertation, University of Würzburg, Würzburg, Germany, 336p.
- Colditz, R.R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schmidt, M., Dech, S., 2008b, TiSeG – A flexible software tool for time series generation of MODIS data utilizing the quality assessment science data set. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46 (10): 3296-3308.
- Colditz, R.R., Conrad, C., Dech, S., 2009, Stepwise automated generation of time series using ranked data quality indicators. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (in preparation).
- GDAL 2009 http://www.gdal.org/formats_list.html.
- Glovis 2009a <http://glovis.usgs.gov/AboutBrowse.shtml#terranames>.
- 2009b <http://glovis.usgs.gov/AboutBrowse.shtml#aquanames>.
- Gonzalez L., Ouzounov D., Nickless D., Leptoukh G., 2006. HDFLook—Multifunctional HDF-EOS Tool for MODIS and AIRS Data Processing at GES DISC DAAC, *Earth Science Satellite Remote Sensing*, 2: 190-201.
- HANTS. 2008a <http://www.ittvis.com/UserCommunity/CodeLibrary/tabid/59/grm2id/1166/Default.aspx>.

- 2008b <http://remotesensing.nlr.nl/upload/verhoef@nlr.nl/Hants.zip>.
- Jönsson, P. y Eklundh, L., 2002. Seasonality extraction by function fitting to times-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), pp. 1824-1832.
- Jönsson, P. and Eklundh, L., 2004. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30, pp. 833-845.
- King, M.D., Closs, J., Wharton, S., Myers, M. and Parkinson, C.L. (Editors), 2004. *EOS data products handbook*, 1, Greenbelt, MD.
- LP DAAC 2009 https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table.
- Roerink, G.J., Menenti, M. and Verhoef, W., 2000. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9), pp. 1911-1917.
- Roy, D.P., Borak, J.S., Devadiga, S., Wolfe, R.E., Zheng, M., Desclotres, J., 2002. The MODIS Land Product Quality Assessment Approach, *Remote Sensing of Environment*, 83: 62-76.
- Timesat 2008 <http://www.nateko.lu.se/personal/Lars.Eklundh/timesat/timesat.html>
- TimeStats 2008 udelhove@lippmann.lu.
- TiSeG 2008 rcolditz@conabio.gob.mx, christopher.conrad@uni-wuerzburg.de.
- Udelhoven 2006, TimeStats: a software tool for analyzing spatial-temporal raster data archives: In: 1st Conference on Remote Sensing and Geoinformation Processing in the Assessment and Monitoring of Land Degradation and Desertification, 7th-9th September 2005, Trier, 8p.

TABLA 3. APLICACIONES PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS MODIS

Aplicación	Capacidades	Plataformas Versión y fecha	Dirección de acceso
Programas de pre-procesamiento			
IMAPP	Procesamiento de nivel LO a nivel LZ ó LZ3.	Linux, V2.0 Ago-2008	http://cimss.ssec.wisc.edu/imapp/
SeaDAS	Procesamiento de nivel LO a nivel LLB para productos oceánicos niveles 2 y 3, reproyección y exportación en diversos formatos.	Linux, Windows V5.2, Mar-2008	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seaDas/
SPA-DRL	Procesamiento de nivel LO a LLB, cálculo de reflectancia con corrección atmosférica, reflectancia con corrección atmosférica y por aerosoles, incendios activos/ anomalías térmicas, temperatura de la superficie terrestre, índices de vegetación.	Versiones conforme a los productos	http://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov/
SIMULCAST	Visualización en cuasi-tiempo real de la recepción de datos MODIS.	Linux, Windows V4.1, May-2008	http://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov/
Programas para conversiones geométricas			
MRT/ MRTSwath	Importación de datos (HDF-EOS) trabajo en tiles o swath, recorte de áreas de interés, reproyección, elaboración mosaicos, exportación en diversos formatos.	Unix, Windows, Linux V4.0, Feb-2008	http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp
HEG	Importación de datos HDF-EOS, reproyección, recorte de área de interés, generación de metadatos, elaboración de mosaicos, trabajo con tiles, exportación en diversos formatos.	Linux, Windows, SUN, MAC OS, V2.9 Sep-2008	http://newsroom.gsfc.nasa.gov/sdptoolkit/HEG/HEGHome.html

TABLA 3. CONTINUÍA

Aplicación	Capacidades	Plataformas Versión y fecha	Dirección de acceso
MSZGT	Importación de datos HDF-EOS, reproyección exportación a archivo genérico binario, trabajo con swath y gránulos.	Unix, V0.5, May-2001	http://nsidc.org/data/modis/ms2gt/
GDAL	Importación de HDF-EOS, reproyección (utiliza el programa proj-4.5.0), elaboración de mosaicos, trabajo solo con tiles en proyección sinusoidal.	Linux, Windows V1.5.1, Abr-2008	http://www.gdal.org/
Programas para visualización y análisis básico			
LDOPE	Diferentes aplicaciones para manipular, visualizar y analizar productos terrestres.	Linux, Irix, Solaris, Windows, Abr-2004	http://pdaac.usgs.gov/landdataac/tools/llope/index.asp
HDF-Look	Visualización de productos MODIS (HDF) nivel L1 y L2 en swath y productos nivel L3 y L4 en grid. Reproyección, recorte de área de interés, exportación a formato ASCII, JPEG, geoTIFF.	Unix, Linux, Mac OS V8.0, Sep-2006	http://www-loa.univ-lille1.fr/Hdflook/hdflook_gb.html
HDF-explorer	Lectura de formatos de HDF, HDF-EOS y HDF5, visualización de la estructura interna del archivo, exportación a diversos formatos.	Windows, V1.4.018	http://www.space-research.org/index.html
HDF-View	Visualización, navegación y edición de los datos de archivos en formato HDF4 y HDF5.	Windows, Solaris, Linux, Mac OS V2.4, Oct-2007	http://www.hdfgroup.org/hdf-java-html/hdfview/index.html
Programas para análisis de series de tiempo			
Timesat	Generación de series de tiempo de NDVI, utilización de técnicas de análisis armónico, funciones de Gauss asimétrica.	Fortran 90, Matlab V2.3, Ene-2010	http://www.nateko.lu.se/personal/Lars.Eklundh/timesat/timesat.html

TABLA 3. CONTINÚA

Aplicación	Capacidades	Plataformas Versión y fecha	Dirección de acceso
Hants	Generación, corrección y suavizado de la serie de tiempo con base a la técnica de análisis armónico.	ENVI, IDL V1.3, Jul-2005	http://www.itvis.com/ UserCommunity/CodeLibrary/ tabid/59/grmZid/1166/ Default.aspx
TiSeG	Generación de series de tiempo, puede ser utilizado para cualquier producto de MODIS.	IDL-VM V1.3, Jun-2008	rcolditz@conabio.gob.mx christopher.conrad@uni-wuerzburg.de
TimeStats	Análisis de series de tiempo, generación de compuestos, análisis anomalías, cálculo de estadísticas globales y estacionales, aplicación de pruebas de significancia.	ENVI V4.0	udelhove@lippmann.lu

CAPÍTULO 4

Una revisión del uso de MODIS para el mapeo y monitoreo de las cubiertas terrestres

Tzitziki Janik García-Mora, Jean-François Mas y Everett Alan Hinkley

RESUMEN

En este capítulo se hace una revisión de varios estudios basados en datos MODIS para el mapeo de la cubierta terrestre. Se describen los productos MODIS utilizados y los procedimientos del pre-procesamiento y los enfoques de clasificación. Posteriormente se examinan las formas de evaluación de la fiabilidad, incluyendo los datos utilizados como referencia. Se exponen los resultados obtenidos, entre otros el sistema de clasificación, el número de categorías y la precisión alcanzada. Finalmente se discuten los enfoques análisis de los datos MODIS como su potencial para monitorear las cubiertas terrestres.

INTRODUCCIÓN

La percepción remota ha sido considerada una tecnología ideal en el monitoreo y mapeo de las cubiertas terrestres debido a su capacidad de proporcionar observaciones sinópticas y repetitivas (Franklin y Wulder, 2002). Desde finales de la década de 1980 se ha prestado mayor atención a la utilización de datos de baja resolución espacial, representados principalmente por el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). El lanzamiento de nuevos sensores de satélites como SPOT 4 VEGETACIÓN (VGT) (Lucía, 1992), MODIS (Barnes et al., 1998; Salomonson et al., 1989; Correr et al., 1994; Wooster, 2007) o MERIS (Medium

Resolution Imaging Spectrometer) con una estrategia global de adquisición sistemática inaugura una nueva era en la percepción remota que, por un lado, provee de datos de alta calidad para el mapeo de la cubierta terrestre a nivel mundial, y por otro lado, la comunidad de investigadores están desarrollando metodologías robustas para la generación de productos que describen la cubierta terrestre (Cihlar, 2000).

Dentro de estos sensores, MODIS destaca al contar con características que lo hacen especialmente adecuado para la caracterización de la cubierta terrestre. Con dos sensores casi idénticos a bordo de dos satélites (Terra y Aqua), MODIS observa la totalidad de la superficie terrestre cada 1 a 2 días. La adquisición de datos se realiza en 36 bandas espectrales entre 0.405 y micras 14.385, con las primeras 7 bandas enfocadas a la observación de la tierra (ver capítulo I). Los numerosos productos derivados de MODIS describen las características de la tierra (ver capítulo II), los océanos y la atmósfera y pueden ser utilizados para los estudios de los procesos a escalas regionales a mundial.

Los datos MODIS ofrecen tres diferentes dimensiones de la información del sensor:

- a) Espectral. La información espectral es una estimación de la reflectancia de la superficie. Esta información incluye imágenes diarias y los compuestos de varias fechas. El producto más directo es el MOD09. Los índices de vegetación son las transformaciones más comunes de la información espectral con el fin de realzar la vegetación verde.
- b) Temporal. La alta resolución temporal de MODIS permite el análisis a través del tiempo, como por ejemplo, el análisis de la fenología de la vegetación que permite distinguir más fácilmente diferentes categorías en comparación con la respuesta espectral tomada en una sola fecha.
- c) Angular. Debido al amplio campo de visión que proporcionan los sensores MODIS, es posible tener registros del mismo pixel muestreado en diferentes geometrías objeto-sensor-sol. Debido a que la distribución de la reflectancia de muchas cubiertas del suelo (vegetación, por ejemplo) es fuertemente anisotrópica, la observación multiangular contiene información adicional a la adquirida únicamente en el nadir o en un solo ángulo (Asner et al., 1998).

Una dimensión adicional incluida en los datos de MODIS es la capa de calidad presentada en forma de índices que expresan las condiciones atmosféricas, un índice general de calidad (índice de utilidad) o la geometría de visión.

Este capítulo es una revisión de varios estudios previos donde se utilizaron datos MODIS en el mapeo de la cubierta terrestre. La primera sección describe los productos MODIS utilizados en los esfuerzos de mapeo, la segunda presenta los procedimientos del pre-procesamiento, la tercera analiza los enfoques de clasificación. La cuarta sección es un examen de evaluación de la fiabilidad incluyendo los datos utilizados como referencia. En la quinta sección se exponen los resultados obtenidos incluyendo el sistema de clasificación, el número de categorías y la precisión alcanzada. Por último, el capítulo concluye con una discusión sobre los enfoques análisis de los datos MODIS como su potencial para monitorear las cubiertas terrestres

INSUMOS UTILIZADOS EN EL MAPEO DE LA CUBIERTA DEL SUELO

Estudios basados en índices de vegetación

El sensor MODIS cuenta con un gran número disponible de productos que pueden ser utilizados en el mapeo del uso y la cubierta del suelo (ver capítulo II), sin embargo, la mayoría de los autores se inclinan por el uso de series de tiempo basadas en el índice de vegetación normalizado (NDVI por sus siglas en inglés). El NDVI se utiliza de manera más frecuente que otros índices principalmente por la continuidad que da a los estudios basados con imágenes AVHRR, facilitando su comparación con otros estudios (Gitelson y Kaufman 1998).

La razón fundamental para utilizar series de tiempo es el aporte que representa la fenología característica de cada tipo de vegetación, con lo que aumenta la posibilidad de distinguirla espectralmente de otra en una clasificación. (Townshend et al. 1991, Defries et al. 1995, Ji y Peters 2007).

Las series de tiempo de NDVI MODIS han demostrado ser útiles en estudios de discriminación de cultivos en el Norte América, Europa y Asia (Mingwei et al. 2008).

Mientras que en algunos estudios resulta favorable ampliar la serie de tiempo a más de un año de datos para retener suficiente información después de eliminar el ruido (Tottrup 2007), en algunos otros se usan series de tiempo parciales, restringiendo sus datos a una época particular de interés como puede ser la época de crecimiento, o de cosecha (Bagan et al. 2005, Sivanpillai y Latchinsky 2007), o periodos libres de nieve (Heiskanen y Kivinen 2008).

Una desventaja del NDVI es que la señal llega a saturarse en condiciones de alta biomasa (Huete 1988), por lo que el uso de otros índices de vegetación ha ido en aumento. Entre ellos el que más destaca es el índice de vegetación mejorado o EVI por sus siglas en inglés. EVI fue diseñado con el propósito de optimizar la señal de la vegetación en aquellas áreas susceptibles a saturar la señal del NDVI (Huete et al. 2002), además de ser más sensible a las variaciones en la cubierta de vegetación verde (Justice et al. 1998, Ferreira et al. 2003). Xavier et al. (2006) observaron este aumento en la sensibilidad que se debe particularmente a la fenología y al tipo de práctica de manejo de la tierra.

Diferentes estudios de la vegetación han demostrado que estos dos índices pueden utilizarse en conjunto para aprovechar las ventajas de cada uno, mejorando la detección de cambios así como la extracción de parámetros biofísicos del dosel (Huete et al. 2002).

También se ha demostrado que el índice de vegetación ajustado al suelo, o SAVI por sus siglas en inglés, tiene la capacidad de minimizar las variaciones del suelo en el dosel de los pastizales y cultivos de algodón. Además cuenta con la ventaja de que puede ser refinado o calibrado para que las variaciones del sustrato se normalicen de una manera eficiente y así evitar un efecto adverso en las mediciones de la vegetación (Huete 1988).

Otros índices de vegetación menos comunes pueden resultar útiles en estudios específicos, Gitelson et al. (2005), sugirieron por primera vez el uso del índice verde o GI por sus siglas en inglés en datos MODIS. El GI es un índice simple calculado como el cociente entre las reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y del verde. De acuerdo a los autores, el GI cuenta con una buena sensibilidad, al tiempo que evita la saturación (Gitelson et al. 2003). Ozdogan y Gutman et al. (2008) probaron que el GI obtiene mejores resultados en el monitoreo subpixel de cultivos de riego.

Estudios basados en datos de reflectancia de la superficie

Los datos de reflectancia de la superficie se pueden considerar como los datos más puros, ya que representan solo la información captada por el sensor sin ninguna transformación, a diferencia de los índices de vegetación. A pesar de que estos datos "puros" son potencialmente útiles para el monitoreo terrestre, su uso es infrecuente y cuando se usan es generalmente para compararlo contra los resultados obtenidos a partir de índices de vegetación. Se usa más frecuentemente el compuesto de 8 días (Carrão et al. 2008).

Los compuestos de 8 días son una nueva imagen generada a partir de los “mejores píxeles” de las 8 imágenes de una semana. De acuerdo a algunas investigaciones preliminares, la diferencia del ángulo de observación causa que píxeles adyacentes tengan diferencias radiométricas en el mismo tipo de cubierta, conduciendo a errores de clasificación (Cihlar 2000).

Para evitar estas dificultades, Wessels et al. (2004) Chen y Rao (2009) y Shimabukuro (2009) usaron datos diarios libres de nube para hacer estudios de mapeo regional. De la misma manera Sedano et al. (2005) usaron imágenes de un solo día en diferentes periodos de la época seca en África.

El uso de combinaciones de datos MODIS

De acuerdo a algunos autores, la incorporación de diferentes tipos de datos MODIS puede aumentar la fiabilidad de los mapas. Por ejemplo, para generar el producto MOD12 de cubierta y dinámica del suelo, Friedl et al. (2010) agregaron a las bandas 1-7 la información del EVI y del producto de temperatura de la superficie de MODIS, usando además en el cálculo del EVI el producto de reflectancia ajustada al nadir.

En determinados tipos de vegetación, el uso de más de un tipo de dato es particularmente útil, al resaltar la respuesta espectral de la misma. Westra y De Wulf (2007) usaron información del infrarrojo medio, infrarrojo cercano y un índice basado en estos dos al que llamaron el “índice de diferencia normalizada del agua”. Combinándolo con el NDVI y el EVI obtuvieron mejores resultados que tomando en cuenta una sola variable.

Otra aproximación es combinar datos de más de un sensor, por ejemplo, Braswell et al. (2003) unieron los datos del sensor espectro-radiómetro del multi-ángulo (MISR) y las bandas múltiples de onda corta de MODIS. Mediante esta sinergia al aprovechar el muestreo simultáneo de estos dos conjuntos de datos obtuvieron un aumento de 20% y 3% en el valor de correlación y de fiabilidad promedio respectivamente.

Yang (2007) empleó una técnica de reducción de datos para evaluar el grado en el que puede aumentarse la fiabilidad de la clasificación de la cubierta mediante el uso de datos de percepción remota multi-espectrales, multi-temporales y multi-angulares en una región del sur de Nuevo México. Utilizaron datos de un año que incluyeron EOS MISR, BRF y compuestos MODIS de 16 días. Clasificaron ocho tipos de cubierta mediante un algoritmo de arboles de decisión mediante una serie

de combinaciones de los datos antes mencionados, encontrando que el mayor aumento en la fiabilidad para tres clases utilizando datos MISR y MODIS.

Acerbi-Junior et al. (2006) realizaron una fusión entre imágenes MODIS y Landsat TM usando la transformada wavelet (o transformada ondula) que es un tipo especial de transformada de Fourier que representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita (denominada ondula madre). Sus resultados indican que la fusión de imágenes de ambos sensores analizadas mediante esta transformada es benéfica, especialmente en áreas donde existen espacios vacíos en las series de tiempo. Los resultados de la clasificación mostraron que las imágenes fusionadas alcanzan resultados comparables al utilizar solo datos Landsat.

Las tres dimensiones de los datos MODIS

Son pocos los autores que intentan comparar las tres dimensiones de datos (temporal, espectral y angular) obteniendo resultados distintos. Carrão et al. (2008) encontraron que la información espectral es más útil en la separabilidad de las clases que la información temporal. En su estudio observaron que la fiabilidad aumenta en la medida que se incorporan más fechas, pero que este efecto desaparece al explotar la información de las 7 bandas. En cambio, aún teniendo información de todo un año de datos MODIS siempre fue necesario contar con por lo menos tres bandas espectrales para obtener una fiabilidad satisfactoria.

Por otro lado, Heiskanen y Kivinen (2008) demostraron que la información multitemporal y angular permite aumentar la fiabilidad en el mapeo forestal. Sus resultados sugieren que la estacionalidad afecta el desempeño del modelo: Los datos tomados en el final de la primavera y principio del verano dan resultados superiores en comparación con los obtenidos a mediados y final del verano.

Incorporación de datos auxiliares

Las similitudes espectrales de muchos tipos de cubierta de suelo presentan un reto al intentar diferenciarlas usando solo información espectral. Este problema aumenta al bajar la resolución espectral del sensor, como sucede al usar datos MODIS.

En varios estudios se intentó usar otras fuentes de información para aumentar la fiabilidad final de los mapas. Para distinguir los tipos de vegetación con respuestas espectrales similares pero ubicadas en diferentes regiones, es útil tomar en cuenta

las condiciones ecológicas. Los datos auxiliares más utilizados son el modelo digital de elevación, seguido por mapas de climas. La pendiente es otro dato útil y fácil de obtener a partir del modelo digital de elevación. Miettinen et al. (2008) usaron datos de elevación como datos auxiliares para separar 12 clases en el sureste de Asia. Friedl et al. (2010) utilizaron datos auxiliares y una combinación de datos MODIS para crear la colección 5 del producto MOD12, incluyendo la reflectancia, la temperatura, la función BRDF y los índices de vegetación EVI, así como información derivada de mapas previos (ver capítulo II). Zhang et al. (2008) usaron datos de textura, elevación, índices de vegetación, cubierta de hielo y nieve, y temperatura de la superficie, superando los resultados obtenidos por el producto MOD12 (colección 4). Ozdogan y Gutman (2008) usaron un mapa potencial de riego derivado de datos de clima y radiancia para mapear áreas irrigadas a partir de datos MODIS. En la tabla 1 se resumen los diferentes esfuerzos de mapeo y datos de entrada revisados en este capítulo.

TABLA 1. LOS DIFERENTES ESFUERZOS DE MAPEO Y DATOS DE ENTRADA REVISADOS

Autor(es) (fecha)	Tipo de mapeo	Productos MODIS	Datos auxiliares	Ubicación del área de estudio
Mingwai et al. (2008)	Discriminación de cultivos	Series de tiempo de NDVI	No	Norte de China
Tottrup (2007)	Fraciones de bosque	Series de tiempo de NDVI	Datos de Elevación	Sureste de Asia
Bagan et al. (2005)	Cubierta de suelo	Serie de tiempo parcial EVI	No	Área árida y semiárida del norte de China
Heiskanen y Kivinen (2008)	Silvicultura	MOD12	No	Finlandia
Xavier et al. (2006)	Cultivos de azúcar	Series de tiempo de EVI	No	Sao Paulo, Brasil
Ozdogan y Gutman (2008)	Mapeo de áreas de agricultura e riego.	Índice verde	Índices basados en Clima, mapas de humedad, mapas de áreas cultivadas.	USA
Carrão et al. (2008)	Cubierta de suelo	Compuestos de reflectancia	No	Portugal

TABLA 1. CONTINÚA

Autor(es) (fecha)	Tipo de mapeo	Productos MODIS	Datos auxiliares	Ubicación del área de estudio
Sedano et al. (2005)	Cubierta de suelo	Imágenes de reflectancia diarias	Mapas de cu- bierta, datos de elevación	Sabana arbolada de miombo, Zambezia, Mozambique.
Friedl et al. (2010)	Cubierta y diná- mica de suelo	EVI, NDVI, y compuestos de reflectancia	LST BRDF NBAR	Global
Westra y De Wulf (2007)	Uso y cubierta de suelo	NDVI, EVI	Índice nor- malizado de humedad	Área semiárida de África
Zhang et al. (2008)	Cubierta de suelo	Compuestos de reflectancia, NDVI cubierta de nieve, LST BRDF	Datos de ele- vación Textura / máscara de agua	Planicie del norte de China
Braswell et al. (2003)	Cubierta de suelo	VIS NIR SWIR	MISR	Amazonas de Brasil
Matsuoka et al. (2007)	Cubierta de suelo	Compuestos de reflectancia	MOD10A2	Este de Asia
Miettinen et al. (2008)	Cubierta de suelo	Compuestos de reflectancia	Datos de eleva- ción y mapas de turberas.	Península de Malasia e islas de Sumatra, Java y Borneo
Sivanpillai y Latchininsky (2007)	Mapeo de hábi- tats de langosta	Compuestos de reflectancia	No	Delta de Amudarya, Uzbekistan
Wessels, K. J., R. S. De Fries, et al. (2004).	Mapeo de cu- bierta regional	Imágenes de reflectancia diarias	No	Yellowstone
Shimabukuro et al. (2009)	Mapeo de áreas quemadas	Imágenes de reflectancia diarias.	No	Oeste del Amazonas Brasil.

Pre-procesamiento de los datos

A pesar de que el pre-procesamiento de los datos es poco mencionado en las investigaciones de uso y cubierta del suelo, este es un paso crítico en el análisis cuando se utilizan datos de satélite. Por la alta resolución temporal así como el gran número de bandas y productos, los conjuntos de datos MODIS usados en el mapeo de la cubierta cuentan con una alta dimensionalidad, por lo cual están propensos a presentar el efecto Hughes, que se define como un descenso en la fiabilidad de la clasificación cuando el número de bandas excede un número determinado para un tamaño de muestra fijo. Una reducción en el número de bandas minimiza este problema, aumentando así la fiabilidad de la clasificación (Hughes 1968, Landgrebe 2003).

Para disminuir los efectos de correlación y de la alta dimensionalidad, es importante contar con una forma de reducción de la base de datos como una fase del pre-procesamiento. Un segundo objetivo del pre-procesamiento es reducir el ruido. La elaboración de compuestos de 8 o 16 días se puede considerar como una forma de reducción de ruido, donde se eliminan los píxeles contaminados con nube o con ángulos de visión oblicuos. Aun después de la reducción de ruido, pueden quedar datos con un alto grado de contaminación, en especial cuando se trata de áreas con lluvias frecuentes. En estos casos, se implementan procedimientos adicionales como el filtrado de series de tiempo. Los métodos de pre-procesamiento no pueden dividirse estrictamente en reducción de ruido o reducción dimensional, debido a que muchos de estos cumplen con ambos propósitos. Algunos métodos de análisis de series de tiempo como son la transformada ondulada y la de Fourier también pueden considerarse como métodos de extracción y reducción de ruido.

Métodos de selección de los datos

Una manera sencilla de discriminar bandas se hace con base en su información de calidad, la cual está incluida como una banda adicional en cada producto (QA). MODIS proporciona la información de la calidad tanto a nivel de producto como pixel a pixel. Un método de selección puede servir para descartar conjuntos completos de datos (por ej. la imagen completa) o grupos de píxeles específicos dentro de la escena. Por ejemplo, Sedano (2008) seleccionó imágenes MODIS libres de nube y humo reduciendo un año de datos a solo 5 fechas.

Algunos autores hacen máscaras para remover píxeles específicos bajo un umbral pre establecido en lugar de un filtro basado solamente en la información de

QA. Como ejemplo, Xiao et al. (2005) observaron que ciertos píxeles con un alto contenido de nube no fueron descartados con base en el QA, por lo que aplicaron un filtro adicional descartando los píxeles con reflectancia en el azul equivalente a 0.2. El resultado es una imagen con espacios vacíos que después puede ser llenados mediante otros métodos como el filtrado temporal.

Cuando las imágenes que pasaron el filtrado de calidad aún presentan información redundante, se puede utilizar métodos complementarios como son las medidas de separabilidad. Estas medidas permiten hacer una evaluación de la distancia estadística entre las muestras de las diferentes categorías de cubierta de suelo en un espacio definido por un determinado número de bandas.

El cálculo de las distancias estadísticas entre cada par de categorías para cada uno de los posibles subconjuntos de bandas permite determinar cuál es el número óptimo de bandas de entrada (el mínimo número de bandas del sub conjunto que permiten la máxima o mejor separabilidad), así como la mejor combinación de las mismas. Dentro de los índices de separabilidad más utilizados se encuentran las medidas de distancia de Bhattacharyya, Mahalanobis, y Jeffreys-Matusita, así como las medidas de divergencia y divergencia transformada (Landgrebe 2003).

Carrão et al. (2008) utilizaron la mediana de Mahalanobis como criterio para ordenar las características temporales y espectrales en su estudio de clasificación de cubierta de suelo en Portugal.

Métodos de extracción de datos

Cuando el conjunto de datos de entrada es muy grande para ser procesado de manera eficiente, y además se sospecha que pueda ser altamente redundante, se debe aplicar un método de extracción de características. El resultado es una representación reducida del conjunto original de datos y se espera que contenga la información más relevante.

El método más común de extracción en percepción remota es el análisis de componentes principales (ACP) que permite la concentración de la información más útil en los primeros componentes que no están correlacionados. Ferreira et al. (2004) usaron ACP en datos similares a MODIS. Cuando los tres primeros componentes que alcanzaron 99.5% del total de la varianza total, se consideraron de manera simultánea, aproximadamente el 91% del total del conjunto de datos se clasificó correctamente. Chen (2005) aplicó 3 ACP a datos MODIS de reflectancia de 250, 500 y 1000 m de resolución espacial respectivamente y encontró que: en

los datos de 250 m más del 95% de la varianza se encontró en el primer componente, mientras que en los datos de 500 y 1000 m se puede reducir a dos o tres componentes con una pérdida del 10% de la varianza total en los diferentes sitios evaluados. Sedano et al. (2005) usaron ACP de una manera distinta, aplicándolo como una técnica de detección de cambios para realzar los cambios estacionales de diferentes tipos de vegetación en su área de estudio.

Otra metodología que vale la pena mencionar es la transformación Tasseled Cap (TCT). Esta metodología inicialmente se desarrolló para imágenes MSS, inspirada en ACP, presentando varias ventajas respecto a este, TCT proporciona índices físicos, concretos y fácilmente interpretables (como son el brillo, el verdor y la humedad). Es importante tomar en cuenta que los coeficientes se determinan de manera empírica, y son válidos solo para un tipo de sensor. TCT se utilizó en principio con imágenes Landsat y posteriormente, Lobser and Cohen (2007) los adaptaron para MODIS, demostrando que TCT tiene un gran potencial en el análisis en los datos MODIS para propósitos de evaluación de la cubierta del suelo.

Filtrado y análisis de series de tiempo

La alta resolución temporal del sensor MODIS, es una característica interesante que permite producir series de tiempo, estas se hacen generalmente a partir de índices de vegetación. El ordenamiento de las series de tiempo, permiten un análisis distinto al de otro tipo de datos (p.ej. bandas espectrales) donde se pueden aplicar herramientas que consideren las variaciones estacionales. Este tipo de técnicas han sido aplicadas en series derivadas de datos AVHRR y se basan principalmente en filtros temporales.

Los filtros temporales consisten en suavizar los valores aberrantes de fechas específicas tomando en cuenta los valores previos y posteriores de la serie. Este suavizado puede obtenerse a través del cálculo de la media o métodos sofisticados de ajuste y se pueden aplicar a todos los datos o solamente a observaciones puntuales detectadas como ruido. Los métodos más usados de ajuste de las series de tiempo son el filtro de media móvil, la gaussiana asimétrica, la doble logística y el filtro de Savitzky–Golay.

El filtro de media móvil consiste en el cálculo de un valor suavizado de una observación promediando los valores anteriores y posteriores. El tamaño de la ventana (número de observaciones previas y posteriores que se toman en cuenta) determina el efecto de suavizado. Una alternativa es usar la mediana en lugar de

la media. El filtro de Savitzky–Golay utiliza funciones locales polinomiales en el ajuste. Es un filtro paso bajo, sin embargo no reduce tanto los valores extremos como ocurre en el método de los promedios, lo cual, por un lado permite capturar cambios sutiles y rápidos en la serie de tiempo, pero también lo hace muy sensible al ruido. Los métodos tanto gaussiana asimétrica y doble logística son semi-locales, esto provoca que sean menos sensibles al ruido y den una mejor descripción en el inicio y final de las estaciones (Jonsson y Eklundh 2002).

Con base en datos MODIS, Boschetti et al. (2009) usaron el método de Savitzky–Golay para suavizar series de tiempo de NDVI. Mingwei et al. (2008) aplicaron el mismo método para remover pixeles marcados como nube en la capa de calidad MODIS. Los resultados muestran que, aunque este filtro compensa hasta cierto punto la pérdida de información de los espacios de la imagen, los valores generados no son equivalentes a la información original. Para evitar sesgos causados por contaminación en la imagen, Van Dijk et al. (1987) sugirieron que un filtrado promedio de ventana móvil es superior comparado contra los mejores ajustes de otras técnicas de suavizado (como los filtros lineares o polinomiales), ya que remueven medidas aberrantes de la serie de tiempo. Esta técnica fue empleada también por Carrão et al. (2008) con datos MODIS.

Un método usado frecuentemente para eliminar ruido y ajustar curvas de índices de vegetación es el análisis de Fourier (Colditz, 2009). Por ejemplo, Jakubauskas et al. (2001) usaron imágenes de fase y amplitud para distinguir tipos de cultivos. Existen varios programas para analizar series de tiempo de MODIS, algunos de los cuales están descritos en el capítulo III.

MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN MÁS UTILIZADOS

Los tipos de clasificación pueden dividirse en dos grandes grupos: clasificaciones “duras” y “difusas”. Este último enfoque es particularmente interesante para intentar compensar la generalización de la información de las imágenes de baja resolución espacial. Esta aproximación ha sido utilizada con datos MODIS por Ozdogan y Gutman (2008), Braswell et al. (2003) y Totrup et al. (2007).

A pesar de los avances en las metodologías de análisis de datos en las últimas décadas, algunos autores todavía utilizan métodos convencionales, por ejemplo Mingwei et al. (2008) utilizan la Máxima Verosimilitud para mapear diferentes tipo de cultivos. Muchos autores utilizan el método de Máxima Verosimilitud solo como referencia para comparar los resultados obtenidos a

partir de otros clasificadores. (Bagan et al. 2005, Westra y De Wulf 2007, Chen y Rao 2009).

Otro tipo de clasificadores cuyo uso se ha popularizado en el análisis de datos son diferentes tipos de redes neuronales. Algunos de estos métodos probados en datos MODIS incluyen mapas autoorganizativos (Bagan et al. 2005), Fuzzy ARTMAP (Borak y Strahler 1999, Sedano et al. 2005), LNNS, simulador de redes neuronales (Westra 2007, Bagan et al. 2005, Borak y Strahler 1999). Estos autores reportan un aumento en la fiabilidad final de los mapas en comparación con la Máxima Verosimilitud.

Los árboles de decisión son otro algoritmo que también se ha probado con datos MODIS. Algunos ejemplos son: Matsuoka et al. (2007) quienes usaron este método para distinguir 11 tipos de cubierta en el este de Asia y Totrupp (2007) quién usó un algoritmo de regresión para generar un modelo que predice una sola variable de respuesta. De acuerdo a algunos autores los árboles de decisión permiten obtener mejores resultados que otras metodologías. Chen y Rao (2009) reportaron que los árboles de decisión superan los resultados obtenidos a partir de Máxima Verosimilitud (con valores de fiabilidad global de 64.5% contra 48.9% respectivamente) al clasificar la cubierta de suelo a partir de datos de reflectancia MODIS.

Algunos autores utilizan métodos menos convencionales, Heiskanen and Kivinen (2008) utilizaron un modelo de regresión binomial generalizada (GLM) para estimar cubierta de dosel. Shimabukuro et al. (2009) utilizaron segmentación y agrupamiento mediante una clasificación no supervisada. Gonçalves et al. (2006) y Carrão et al. (2008) utilizaron el método de máquinas de vectores de soporte.

MEDICIÓN DE LA FIABILIDAD

El cálculo de fiabilidad es una tarea esencial en la fase final de la clasificación. Sin embargo, está muy limitada por los recursos disponibles, y sigue siendo un reto especialmente para los productos globales y regionales (Defries et al. 1998, Cihlar 2000). Es importante contar con un conjunto de datos de referencia robusto para el cálculo de la fiabilidad del mapa evaluado.

El método más común para evaluar la fiabilidad final obtenida de los mapas MODIS es la comparación contra clasificaciones obtenidas a partir de datos de mejor resolución espacial (Friedl et al. 2002, Latifovic et al. 2004), otros mapas de cubierta (Liu et al. 2003, Boles et al. 2004, Han et al. 2004, Giri et al. 2005)

o a un subconjunto de los datos de entrenamiento (validación cruzada) (Friedl et al. 2010). El uso de censos y trabajo de campo en la validación de clasificaciones MODIS es menos común debido, por un lado, a la escasez de este tipo de datos y por otro a la dificultad de comparar datos detallados con imágenes de baja resolución. Para superar este problema de escala, algunos autores optan por el remuestreo de los datos de referencia para hacerlos comparables. En el caso de trabajo de campo, donde se manejan datos puntuales, una alternativa es utilizar una aproximación difusa, en la cual, cuando el área es heterogénea o se encuentre fragmentada, el dato de campo considere más de una clase que puede ser tomada como correcta en la evaluación del mapa.

Otra consideración importante para evitar sesgos en la evaluación de la fiabilidad de los mapas, es asegurar que los datos de entrenamiento sean independientes de los datos de referencia, especialmente cuando se utiliza la validación cruzada. Con esta finalidad, Friedl et al. (2010) estratificaron su base de datos de entrenamiento en diez sub conjuntos únicos (en lugar de píxeles individuales) para evitar la correlación espacial entre los datos de entrenamiento y los datos de verificación. Con este enfoque se reduce en cierta medida sesgos en la evaluación. Sin embargo, como los sitios de entrenamiento están determinados por polígonos derivados de imágenes de mejor resolución, aún existe un sesgo en las áreas homogéneas, que tienen una mayor probabilidad de resultar calificadas correctamente (Jung et al. 2006).

En el caso de las clasificaciones difusas, tanto los datos de referencia como los del mapa se expresan como variables continuas (p.ej. valores difusos de proporciones estimadas de cubierta contra proporciones verdaderas) y los índices más comúnmente utilizados para evaluar las diferencias entre los valores estimados y reales son: el coeficiente de correlación, la raíz del error medio cuadrático (ambos utilizados por Braswell et al. 2003), y la evaluación del sesgo (Muukkonen y Heiskanen 2007).

En las clasificaciones duras, los índices más utilizados son la fiabilidad global y el coeficiente de Kappa. Unos pocos autores como Cohen et al. (2003) y Heiskanen y Kivinen (2008) proporcionan índices de fiabilidad por clase, tales como la fiabilidad de usuario y productor o la matriz de confusión. La fiabilidad por clase es un dato importante porque el rango de fiabilidad dentro de una clase específica es generalmente amplio (véase, por ejemplo Friedl et al. 2010). Cuando se presenta la matriz de confusión completa, se brinda la oportunidad de aprovechar esta información para la generación de nuevos índices de fiabilidad (Stehman y Czaplewski 1998).

RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS REVISADOS

Dependiendo del problema a resolver en cada estudio, se determina el número de categorías de cubierta. Para algunos casos es suficiente con discriminar solo dos categorías, como puede ser; bosque / no bosque (Westra y De Wulf 2007) o agricultura riego / no riego (Ozdogan y Gutman 2008). Otros estudios tienen un número reducido de clases y son escasos aquellos que incluyen más de diez. Por ejemplo, Matsuoka et al. (2007) y Borak y Strahler (1999) tomaron en cuenta 14 y 11 categorías respectivamente. Los mapas globales de cubierta terrestre generalmente están basados en el sistema de clasificación de la IGBP con 17 categorías a nivel mundial (Bagan et al. 2005, Friedl et al. 2010, Borak y Strahler 1999).

Como se muestra en la tabla 2, la fiabilidad obtenida a partir de los estudios realizados con MODIS varía de un caso a otro. Depende del tipo de clasificación, el número de categorías, y la evaluación de la fiabilidad efectuada. En la mayoría de los casos si se utiliza una clasificación con clases muy generales los resultados varían desde un 74% hasta 91%.

Estos resultados parecen suficientes para la mayoría de las aplicaciones cartográficas. Sin embargo, debido a que se utilizan diferentes bases de datos y enfoques, hay que subrayar que las medidas reportadas de fiabilidad no son comparables y no deben considerarse como estimaciones cuantitativas robustas. Algunos métodos se basan en esquemas de muestreo, mientras que otros en validaciones cruzadas que suelen arrojar resultados más optimistas. Una alternativa promisoría en la medición de la fiabilidad es la cuantificación de pertenencias o proporciones a través de un enfoque de lógica difusa (ver capítulo XI). Este método fue utilizado para evaluar el mapa MOD12 IGBP de las áreas de bosque en México MOD12 IGBP con una muestra de datos de campo (más de 24,000 conglomerados en 4 sitios de observación) y un mapa de cubierta de suelo (Couturier 2011). Con base en la opción más estricta (sin tolerancia difusa) y la más flexible, la fiabilidad del mapa es de 54.6% y 65% respectivamente.

Como se puede ver en la tabla 2, existen diversas maneras de analizar los datos MODIS. Algunas de las metodologías implementadas en los estudios revisados son las mismas que se han utilizado con otros sensores, otras técnicas han sido adecuadas a las características del sensor MODIS y algunas otras son innovadoras.

Es necesario considerar que los resultados obtenidos no dependen únicamente del tipo de dato y la metodología empleada, las condiciones ambientales varían

TABLA 2. TIPOS DE AMBIENTE, NÚMERO DE CATEGORÍAS Y FIABILIDADES OBTENIDAS EN ESTUDIOS CON DATOS MODIS

Autor(es) (fecha)	Esquema de clasificación (número de categorías)	Categorías	Datos de referencia usa- dos en la evaluación de fiabilidad	Fiabilidad obtenida	Área de estudio
Bagan et al. (2005)	IGBP (9)	1. Perenne hojas aciculares 2. Perenne de hojas anchas. 3. Caducifolio de hojas anchas 4. Pastizales 5. Humedales Permanentes 6. Cultivos 7. Urbano 8. Suelo desnudo / raro 9. Agua	Mapa de cubierta generado de datos Landsat y ASTER	FG = 91.1% K =0.8998 // fiabilidad por clase de 75 a 100%	Varias regio- nes de China
Borak y Strahler (1999) *	IGBP (11)	1. Perenne hojas aciculares 2. Perenne de hojas anchas. 3. Caducifolio de hojas anchas. 4. Bosque mixto 5. Sabana, 6. Pastizal, Matorral cerrado, 7. Matorral abierto, 8. Cultivos 9. Urbano 10. Suelo desnudo 11. Rocoso	Mapa generado del progra- ma de análisis Gap (GAP)	FG = 78.6%, //fiabilidad por clase de 28 a 100%	Región semi-árida de Arizona USA
Braswell et al. (2003)	Diseñadas para el estudio (3 a 4)	1. Bosque 2. Área clareada 3. Vegetación secundaria	Clasificación Landsat TM	RMSE de 0.01 a 0.27	Región del Amazonas en Brasil
Cairão et al. (2008)	CORINE Cubierta de suelo (9)	1. Áreas artificiales 2. Cultivos irrigados 3. Cultivos de temporal 4. Bosque de hojas anchas 5. Bosque de hojas aciculares 6. Pastizal natural 7. Matorral 8. Suelo desnudo 9. Agua	Mapa de cubierta de CORINE + Landsat y fotos aéreas	FG =90%	Portugal
Chen y Rao (2009)	Diseñadas para el estudio (4)	1. Fango, 2. Pastizal degradado, 3. Cultivos 4. Agua	Interpretación de datos Landsat validada con trabajo de campo	FG= 64.5 K =0.45	

TABLA 2. CONTINUÍA

Autor(es) (fecha)	Esquema de clasificación (número de categorías)	Categorías	Datos de referencia usados en la evaluación de fiabilidad	Fiabilidad obtenida	Área de estudio
Matsuoka et al. 2007	IGBP (14)	1. Perenne hojas aciculares 2. Perenne hojas anchas 3. Caducifolia de hojas aciculares 4. Caducifolia de hojas anchas, 5. Matorral abierto 6. Pastizales 7. Cultivos (incluye arrozales) 8. Cultivos (sin arrozales) 9. Doble cultivo (incluye arrozales) 10. Doble cultivo (sin arrozales) 11. Campos irrigados 12. Urbano 13. Nieve y hielo. 14. Suelo desnudo. 15. Agua	Comparación basada en píxel comparada con MOD12Q1 Comparación basada en provincias por medio de un mapa de cubierta de suelo a 1 km de resolución y censos.	Fiabilidad por clase de 14-84%. Los resultados numéricos contra el mapa de cubierta y censos no se presentan.	Este de Asia
Miettinen et al. (2008)	Diseñadas para el estudio (11)	1. Agua 2. Manglar 3. Vegetación hidrófila 5. Bosque bajo 6. Bosque de baja montaña 7. Bosque de alta montaña 8. Plantaciones 9. Mosaico montano 10. Abierto en tierras bajas 11. Urbano	Muestreo aleatorio estratificado contra clasificación SPOT	FG= 82% / K= 0.77	Parte oeste del sureste insular en Asia
Ozdogan y Gutman (2008)	Diseñadas para el estudio (2)	1. Riego 2. No riego	Base de datos de irrigación	Correlación 0.88 entre las áreas estimadas contra las zonas de irrigación reportadas	EUA

TABLA 2. CONTINUÍA

Autor(es) (fecha)	Esquema de clasificación (número de categorías)	Categorías	Datos de referencia usados en la evaluación de fiabilidad	Fiabilidad obtenida	Área de estudio
Shimabukuro et al. (2009)	Diseñadas para el estudio (1)	Área quemada	Imágenes Landsat clasificación, observaciones de campo	Correspondencia visual, no se presentan datos numéricos	Oeste de Brasil en el Amazonas
Sivanpillai y Latchininsky (2007)	Diseñadas para el estudio (6)	1. Caña 2. Caña y mezcla de arbustos 3. Arbustos 4. Vegetación dispersa, 5. Suelo arenoso 6. Agua.	Fotografía digital datos de campo Imágenes Landsat entrevistas	OA = 74% K = 0.67	Amurdaya River Delta Uzbekistan
Tottrup (2007)	Diseñadas para el estudio (3)	1. Bosque maduro 2. Bosque secundario 3. No-bosque	Clasificaciones de SPOT, ASTER e IKONOS	Desviación media absoluta entre 14.6% y 21.6%	Sureste de Asia, tierras altas de Vietnam, Laos, Camboya, y Tailandia
Westra y De Wulf (2007)	Diseñadas para el estudio (5)	1. Tierras áridas 2. Área inundada 3. arroz 4. cultivos, 5. cuerpos de agua permanentes	Validación cruzada	K = 0.98	Llanuras de inundación Camerún
Zhang et al. (2008)	Diseñadas para el estudio (8)	1. Cultivos, 2. pastizales densos, 3. pastizales dispersos 4. Bosque de aciculares 5. Bosque de hojas anchas 6. Arbustos, 7. Urbano 8. Agua	Clasificación Landsat	OA 75.5% PCA 35.4-96.3%	Planicie del norte de China

enormemente en diferentes regiones del planeta, lo que añade complejidad a los esfuerzos de mapeo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Debido a la gran cantidad de datos y la presencia de ruido, el pre-procesamiento de los datos MODIS es crucial. En la literatura, se reportaron enfoques muy variados para procesar datos MODIS (selección y extracción de datos, filtrado y análisis de serie de tiempo). Una característica única de los datos MODIS es la capa de información sobre la calidad de los datos pixel a pixel, la cual ha sido poco utilizada hasta ahora, tal vez porque hasta ahora no ha sido totalmente confiable (Xiao 2005, García-Mora y Mas 2011). Los productos más utilizados son los índices de vegetación, seguido por la reflectancia. Sin embargo, hay muchos esfuerzos de mapeo realizados con base en una combinación de productos MODIS, con datos auxiliares (elevación por ejemplo) o de otros sensores. Se observa también una gran variedad de métodos de clasificación, un enfoque recurrentemente reportado por su buen desempeño son los árboles de clasificación. Sería interesante desarrollar métodos de clasificación que tomen en cuenta la capa de calidad como insumo adicional, pero no se encontró ningún reporte de tales métodos en nuestra revisión. Debido a las grandes extensiones cubiertas, la evaluación de la fiabilidad se basa a menudo en clasificaciones obtenidas a partir de datos de mejor resolución espacial, otros mapas de cubierta o a un subconjunto de los datos de entrenamiento (validación cruzada). En muchos casos, no hay una independencia total entre los datos de entrenamiento y de verificación, o bien los datos de verificación están ubicados en áreas homogéneas, lo cual podría llevar a estimaciones sesgadas. Sin embargo, los resultados muestran que MODIS permite generar mapas de uso y cobertura del suelo con un nivel relativamente detallado (sistema de clasificación equivalente al IGBP) con una fiabilidad aceptable (> 70%).

Debido a su baja resolución espacial, MODIS no puede reemplazar a los datos de resolución media como Landsat o SPOT pero representa un complemento muy útil, permitiendo por ejemplo llenar la ausencia de datos entre dos esfuerzos de mapeo a detalle. Por otro lado permite identificar áreas que sufrieron incendios o desmontes (ver capítulos V, VI y VII), hacia donde dirigir esfuerzos de actualización cartográfica.

REFERENCIAS

- Acerbi-Junior, F. W., Clevers, J. G., and Schaepman, M. E., 2006. The assessment of multi-sensor image fusion using wavelet transforms for mapping the Brazilian Savanna. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (4), 278-288.
- Asner, G. P., Wessman, C. A., and Archer, S., 1998, Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications*, 8(4), 1003-1021.
- Atkinson, P. M., Dash, J., and Jeganathan, C., 2009. Analysing the effect of different geocomputational techniques on estimating phenology in India. In B. G. Lees, and S. W. Laffan (Ed.), *10th International Conference on GeoComputation*, UNSW, Sydney. Sydney.
- Bagan, H., Wang, Q., Watanabe, M., Yang, Y., and J. Ma., 2005. Land cover classification from MODIS EVI times-series data using SOM neural network. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4999-5012.
- Barnes, W. L., Pagano, T. S., and Salomonson, V. V., 1998. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) on EOS-AM/1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1088-1100.
- Boles, S. H., Xiao, X., Liu, J., Zhang, Q., Munkhtuya, S., Chen, S., and D. Ojima., 2004. Land cover characterization of Temperate East Asia using multi-temporal VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 90, 477-489.
- Borak, J. S., and Strahler, A. H., 1999. Feature selection and land cover classification of a MODIS-like data set for a semiarid environment. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 919-938.
- Boschetti, L., Stroppiana, M. D., Brivio, P. A., and Bocchi, S., 2009. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. *International Journal of Remote Sensing*, 30 (18), 4643-4662.
- Braswell, B. H., Hagen, S. C., Salas, W. A., and Froking, S. E., 2003. A multivariable approach for mapping sub-pixel land cover distributions using MISR and MODIS: An application in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 87, 243-256.
- Bruce, L. M., Mathur, A., and Byrd, J. D., 2006. Denoising and Wavelet-Based Feature Extraction of MODIS Multi-Temporal Vegetation Signatures. *GIScience and Remote Sensing*, 43, 170-180.
- Carrão, H., Gonçalves, P., and Caetano, M., 2008. Contribution of multispectral and multi-temporal information from MODIS images to land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 112, 986-997.

- Chen, S., 2005. Initial assessment of Terra-MODIS reflectance data structure for land surface applications in Northeast Asia. *Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05, IEEE International* 6, 3899-3901.
- Chen, S., and Rao, P., 2009. Regional Land Degradation Mapping Using MODIS Data and Decision Tree (DT) Classification in a Transition Zone between Grassland and Cropland of Northeast China. *2009 First IEEE International Conference on Information Science and Engineering*, 1395-1398.
- Cihlar, J., 2000. Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. *International Journal of Remote Sensing*, 21 (6-7), 1093-1114.
- Cohen, W. B., Maierberger, T. K., Yang, Z., Gower, S. T., Turner, D. P., Ritts, W. D., M. Berterretche and S. W. Running, 2003. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+. *Remote Sensing of the Environment*, 88, 233-255.
- Colditz, R. R., 2008. Time series generation and classification of MODIS data for land cover mapping. PhD thesis, University of Würzburg, Würzburg, Germany.
- Couturier, S. 2011. Evaluación de la cobertura vegetal en México: aciertos y sesgos del mapa derivado del sensor MODIS, in *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Mexico: INE-SEMARNAT, CIGA-UNAM, pp. 278-308.
- Couturier, S., Mas, J. F., Cuevas, G., Benítez, J., Vega, A., and Tapia, V., 2009. A thematic-focused accuracy assessment of land cover maps for highly biodiverse regions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75 (7), 789-806.
- Defries, R. S., Field, C. B., and Fung, I., 1995. Mapping the land surface for global atmosphere-biosphere models: toward continuous distributions of vegetations's functional properties. *Journal of Geophysical Research*, 100 (20), 867-882.
- Defries, R. S., Hansen, M., Townshend, J. R., and Sohlberg, R., 1998. Global land cover classification at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3141-3168.
- FAO 1997 Progress Report., 1997, FAO 1997 Progress Report, Integrated approach to the planning and management of land resources.
- Ferreira, L. G., Yoshioka, H., Huete, A., and Sano, E. E., 2004. Optical characterization of the Brazilian savanna physiognomies for improved land cover monitoring of the cerrado biome: preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. *Journal of Arid Environments*, 56 (3), 425-447.
- Ferreira, L. G., Yoshioka, H., Huete, A., and Sano, E. E., 2003. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian cerrado: an analysis within the large-scale biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA). *Remote Sensing of Environment*, 87, 534-550.

- Franklin, S. E., and Wulder, M., 2002. Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas. *Progress in Physical Geography*, 26 (2), 173-205.
- Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C., Xiang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., H., Woodcock, C E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F., and Schaaf, C., 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83, 287-302.
- Friedl, M. A., Menashe, D. S., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., and X. Huang, 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114, 168-182.
- Gao, Y., Mas, J.F. and Navarrete, A., 2009. The improvement of an object-oriented classification using multi-temporal MODIS EVI satellite data. *International Journal of Digital Earth*, 2(3), 219-236.
- García-Mora, T. J., and Mas, J.F., 2010. Evaluación de Imágenes del Sensor MODIS para la Cartografía de la Cobertura del Suelo en una Región Altamente Diversa de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1): 83-94.
- Giri, C., Zhu, Z., and Reed, B., 2005. A comparative analysis of the Global Land Cover 2000 and MODIS land cover datasets. *Remote Sensing of Environment*, 94, 123-132.
- Gitelson, A. A., Viña, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G., and Leavitt, B., 2003. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*, 30, 1248.
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., and Arkebauer, T. J., 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32, L08403.
- Gitelson, A., and Kaufman, Y., 1998. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series - Spectral considerations. *Remote Sensing of Environment*, 66 (3), 343-350.
- Gonçalves, P., Carrão, H., Pinheiro, A., and Caetano, M., 2006. Land cover classification with support vector machine applied to MODIS imagery. In A. Marçal (Ed.), *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space* (517-526). Rotterdam: Millpress.
- Han, K. S., Champeaux, J. L., and Roujean, J. L., 2004. A land cover classification product over France at 1 km resolution using SPOT4/VEGETATION data. *Remote Sensing of Environment*, 92 (1), 52-66.
- Heiskanen, J., 2008. Evaluation of global land cover data sets over the tundra-taiga transition zone in Northernmost Finland. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (13), 3727-3751.

- Heiskanen, J., and Kivinen, S., 2008. Assessment of multispectral, temporal and angular MODIS data for tree cover mapping in the tundra-taiga transition zone. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2367-2380.
- Herold, M., Latham, J. S., Di Gregorio, A., and Schmullius, C.C., 2006. Evolving standards in land cover characterization. *Journal of Land Use Science* 1 (2 - 4), 157-168.
- Huete, A., 1988, A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E. P., Gao, X., and Ferreira, L. G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS Vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.
- Hughes, G. F., 1968, On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. *IEEE Transactions on Information Theory* IT-14, 55-63.
- Jakubauskas, M. E., Legates, D. R., and Kastens, J. H., 2001. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67 (4), 461-470.
- Ji, L., and Peters, A. J., 2007. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function. *Remote Sensing of Environment*, 106 (1), 59-65 .
- Jonsson, P., and Eklundh, L., 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (8), 1824-1832.
- Jonsson, P., and Eklundh, L., 2004. TIMESAT—A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computer Geoscience*, 30 (8), 833-845.
- Jung, M., Henkel, K., Herold, M., and Churkina, G., 2006. Exploiting synergies of global land cover products for carbon cycle modeling. *Remote Sensing of Environment*, 101, 534-553.
- Justice, C.O., E. Vermote, J. Townshend, R. Defries, J. A. Royle, D. Hall, V. Salomonson, J. L. Privette, G. A. Riggs, A.H. Strahler, W. Lucht, R.B. Myneni, Y. Knyazikhin, S. W. Running, R. R. Nemani, Z.M. Wan, A.R. Huete, W.J.D. van Leeuwen, R.E. Wolfe, L. Giglio, J-P Muller, P. Lewis and M.J. Barnsley, 1998, The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 (4), 1228-1249.
- Landgrebe, D., 2003. *Signal theory methods in multispectral remote sensing*, (Hoboken, New Jersey: J. Wiley & Sons), 508 p.
- Latifovic, R., Zhu, Z., Cihlar, J., Giri, C., and Olthof, I., 2004. Land cover mapping of North and Central America—Global Land Cover 2000. *Remote Sensing of Environment*, 89, 116-127.

- Liu, J., Liu, M., Zhang, D., and Deng, X., 2003. Study on spatial patterns of land use change in China during 1995–2000. *Science in China (series D)*, 46, 373-384.
- Matsuoka, M., Hayasaka, T., Fukushima, Y., and Honda, Y., 2007. Land Cover in East Asia Classified Using Terra MODIS and DMSP OLS Products. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (2), 221-248.
- Mausel, P., Kramber, J., and Lee, J., 1990. Optimum band selection for supervised classification of multispectral data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 55-60.
- Miettinen, J., Wong, C. M., and Liew, S. C., 2008. New 500 m spatial resolution land cover map of the western insular Southeast Asia region. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 29 (20), 6075-6081.
- Mingwei, Z., and Qingbo, Z., 2008. Crop discrimination in Northern China with double cropping systems using Fourier analysis of time-series MODIS data. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 10 (4), 476-485.
- Moretton, P. A., and Toloi, C. M., 2006. *Análise de Séries Temporais*. (E. Blücher, Ed.) LTDA.
- Morisette, J., Privette, J., and Justice, C., 2002. A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing of Environment*, 83, 77-96.
- Muukkonen, P., and Heiskanen, J., 2007. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data, ASTER and MODIS satellite data: a possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*, 107 (4), 617-624.
- NASA MODIS Web - Components of MODIS, 2008. Retrieved 2008: from The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer website that houses all central information on the MODIS project: Disponible en línea en: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php> (accessed 16 May 2010).
- Nightingale, J. M., Coops, N. C., Waring, R. H., and Hargrove, W. W., 2007. Comparison of MODIS Gross Primary Production estimates for forests across the U.S.A. with those generated by a simple process model. *Remote Sensing of Environment*, 109, 500-509.
- Nightingale, J., Nickeson, J. E., Justice, C. O., Baret, F., Garrigues, S., Wolfe, R., and E. Matsuoka, 2009. Global validation of EOS land products, lessons learned and future challenges: A MODIS case study. *33rd Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Stresa, Italia.
- Oliveira, T. C., Oliveira, L. T., Carvalho, L. M., Martinhago, A. Z., and Freitas, S. G., 2009. Comparison of MODIS NDVI Time Series filtering by Wavelets and Fourier analysis to Generate Vegetation Signatures. In: *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento*

- Remoto. 14, 1465-1472. São José dos Campos: INPE. Disponible en línea en: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.12.12/doc/1465-1472.pdf> (accessed 16 May 2010).
- Ozdogan, M., y Gutman, G., 2008. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3520-3537.
- Roerink, G. J., Menenti, M., and Verhoef, W., 2000. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21 (9), 1911-1917.
- Roy, D.P., Borak, J.S., Devadiga, S., Wolfe, R.E., Zheng, M., and Descloitres, J., 2002. The MODIS Land product quality assessment approach. *Remote Sensing of Environment*, 83, 62-76.
- Running, S. W., Justice, C. O., Salomonson, V., Hall, D., Barker, J., Kaufmann, Y. J., A. H. Strahler; A. R. Huete; J.-P. Muller; V. Vanderbilt; Z. M. Wan; P. Teillet; D. Carneggie., 1994, Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3587-3620.
- Saint, G., 1992, VEGETATION onboard SPOT 4: mission specifications. In Report No. 92102.
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N., and Ohno, H., 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96 (3-4), 266-374.
- Salomonson, V. V., Barnes, W. L., Maymon, P. W., Montgomery, H. E., and Ostrow, H., 1989, MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27, 145-153.
- Sedano, F., Gong, P., and Ferrao, M., 2005. Land cover assessment with MODIS imagery in southern African Miombo ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 98, 429-441.
- Shimabukuro, Y. E., Arai, E., Duarte, V., Freitas, R. M., Lima, A., Valeriano, D. M., F. Brown; M. L. R. Maldonado, 2009. Fraction images derived from Terra Modis data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*, 30 (6), 1537-1546.
- Sivanpillai, R., and Latchininsky, A. V., 2007. Mapping locust habitats in the Amudarya River Delta, Uzbekistan with multi-temporal MODIS imagery. *Environmental Management*, 39 (6), 876-886.
- Stehman, S. V., y Czaplewski, R. L., 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment*, 64, 331-344.

- Stern, A.J., Doraiswamy, P.C. y Akhmedov, B., 2009. Techniques for developing land-use classification using moderate resolution imaging spectroradiometer imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3, 033517.
- Tottrup, C., 2007. Forest and land cover mapping in a tropical highland region. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73 (9), 1057-1065.
- Townshend, J., Justice, C., Li, W., Gurney, C., and McManus, J., 1991. Global land cover classification by remote sensing: Present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of the Environment*, 35, 243-255.
- Van Dijk, A., Callis, S. L., Sakamoto, C. M., and Decker, W. L., 1987. Smoothing vegetation index profiles: An alternative method for reducing radiometric disturbances in NOAA/AVHRR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, 1059-1067.
- Wessels, K. J., De Fries, R. S., Dempewolf, J., Anderson, L. O., Hansen, A. J., and Powel, S. L., 2004. Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: Examples from the Great Yellowstone ecosystem, USA and Pará State, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 92, 67-83.
- Westra, T., and De Wulf, R. R., 2007. Monitoring Sahelian floodplains using Fourier analysis of MODIS time-series data and artificial neural networks. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (7), 1595-1610.
- Woodcock, C., and Gopal, S., 2000. Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation. *International Journal of Geographical Information Science*, 14, 153-172.
- Wooster, M., 2007. Remote sensing: sensors and systems. *Progress in Physical Geography*, 31, 95-100.
- Xavier, A. C., Rudorff, B. F., Shimabukuro, Y. E., Berka, L. M., and Moreira, M. A., 2006. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (4), 755-768.
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Froking, S., Li, C., Salas, W., Moore, B., 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 95, 480-492.
- Yang, L., 2007. Land cover characterization using EOS MISR and MODIS data and a decision tree classifier, *Geocarto International*, 21(3): 1-8.
- Zhang, X., Sun, R., Zhang, B., and Tong, Q., 2008, Land cover classification of the North China Plain using. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, 476-484.

CAPÍTULO 5

Detección operacional de deforestación y de áreas quemadas en tiempo casi real por medio de imágenes del sensor MODIS

Yosio E. Shimabukuro, João R. Santos, Bernardo F. T. Rudorff, Egídio Arai, Valdete Duarte, André Lima

RESUMEN

Este capítulo presenta la aplicación operacional del uso de imágenes del sensor MODIS para detección de áreas deforestadas (DETER - Proyecto de Detección de Áreas Deforestadas en Tiempo Real) y de áreas quemadas (DETEQ - Proyecto de Detección de Áreas Quemadas) en formaciones de bosques tropicales en la Amazonía brasileña. Se hace una descripción de la metodología de clasificación de las imágenes MODIS, de los proyectos DETER y DETEQ, donde se evalúa el uso del modelo lineal de mezcla espectral, la segmentación de las imágenes (fracción suelo - DETER y fracción sombra - DETEQ), la clasificación no supervisada por regiones y la edición de la clasificación. Luego se describe el resultado del análisis de las imágenes MODIS para el proyecto DETER, realizadas entre agosto de 2004 y agosto de 2006. Este análisis demuestra que hubo una disminución significativa en el área deforestada durante el periodo 2004/2005 (8,856 km²) y para el periodo 2005/2006 (5,035 km²). Es posible que parte de esta disminución se deba al monitoreo operacional realizado por el DETER con las imágenes MODIS. Posteriormente se presenta el resultado del análisis de las imágenes MODIS, del proyecto DETEQ, realizada en el estado de Acre en 2005, donde fueron mapeados alrededor de 6,500 km² de áreas quemadas, siendo que 3,700 km² en áreas previamente deforestadas y 2,800 km² en áreas de bosque. Se sugiere que la futura implementación operacional del proyecto DETEQ deberá reducir las incerti-

dumbres relacionadas con la cuantificación de áreas quemadas. Asimismo, proveer informaciones cuantitativas para evaluar la contribución de Brasil en la emisión de gases de efecto invernadero provocado por la quema de bosques y mejorar el control y vigilancia de quemadas ilegales en la Amazonía brasileña. Finalmente, se concluye que las imágenes adquiridas por el sensor MODIS pueden ser utilizadas de modo operacional tanto para detectar áreas deforestadas como para mapear áreas quemadas en tiempo casi real.

INTRODUCCIÓN

La Amazonía brasileña ocupa un área de 5 millones de km², con una complejidad de paisajes, que incluyen diversas formaciones vegetales de sabana y de bosque. Las formaciones forestales ocupan aproximadamente 3.8 millones de km² y el monitoreo de las actividades de deforestación de esa vasta región tropical es realizado sistemáticamente por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), utilizando productos y técnicas de percepción remota orbital apoyado por los Sistemas de Información Geográfica. Durante las dos últimas décadas este monitoreo se llevó a cabo anualmente a través del uso de 229 imágenes Landsat TM (Thematic Mapper), libres o parcialmente libres de cobertura de nubes (Proyecto PRODES – <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>). A partir de ese monitoreo es posible estimar el área anual y la tasa bruta de deforestación ocurrida en los años analizados. Además, es también posible evaluar la deforestación por tipología forestal, por tamaño de polígonos y/o por áreas administrativas a nivel estatal o municipal, a través del cruce de capas de información diversas.

La deforestación de la Amazonía brasileña está asociada a la expansión de la actividad de extracción de madera y de la frontera agrícola, con la consecuente implantación de polos de desarrollo y de programas de asentamiento humano y de reforma agraria (Houghton et al., 2000; Fearnside, 2005). La conversión de bosque a otras formas de uso de suelo, muchas de las cuales con fuertes características de degradación del paisaje, ocurre en un acelerado proceso temporal (Morton et al., 2006). El monitoreo anual realizado por el Proyecto PRODES no es suficiente para el control y vigilancia de las prácticas conduciendo a la degradación de los ecosistemas amazónicos. Estas prácticas, sin el apropiado uso de técnicas de manejo, causan fragmentación de los hábitats (Uhl et al., 1988; Uhl y Kauffman, 1990), pérdida de biodiversidad (Bierregaard et al., 1992; Vitousek, 1994), pérdida de potencial edáfico (Wright et al., 1992) y alteraciones en el ciclo hidrológi-

co (Nepstad et al., 1994). Además, causan graves problemas sociales (Hogan et al., 2002) como concentración de tierra, baja fijación de agricultores en el campo y urbanización precaria.

Tomando en cuenta la complejidad de los problemas mencionados se vuelve importante disponer de un sistema basado en imágenes de satélite y en técnicas de extracción de datos que sean capaces de generar informaciones en tiempo casi real de esa vasta región. Estas informaciones pueden servir de base para la planificación y la formulación de nuevas directrices para agilizar la toma de decisiones. También puede facilitar la presencia reguladora del Estado Brasileño en la política de organización del sistema productivo en conformidad con las cuestiones ambientales. En una concepción simple, la idea es disponer de conocimientos actuales y suficientes para pronosticar situaciones que caracterizan el inicio y el modo de degradación del paisaje y modelan el fenómeno y sus condiciones de entorno.

En ese contexto se crearon dos proyectos: (a) Detección de Áreas Deforestadas en Tiempo Casi Real (DETER - <http://www.obt.inpe.br/deter/>); y (b) Detección de Áreas Quemadas en Tiempo Casi Real (DETEQ). Los dos proyectos tienen como objetivo suplir la carencia de predicciones específicas acerca de la temática de deforestación y quemadas utilizando imágenes de alta temporalidad del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para monitorear en tiempo casi real las acciones humanas en la selva. Es decir, el DETER (Shimabukuro et al., 2007) funciona como un sistema de alerta de deforestación que le permite al Estado Brasileño combatir actividades ilícitas de deforestación. El DETEQ, a su vez, funciona como un sistema de detección y monitoreo de quemadas que permite un análisis temporal de recurrencia y permanencia del proceso de quema en una región específica. Asimismo, con la integración de otros datos ambientales, minimiza la expansión de riesgos de grandes incendios forestales.

Las imágenes de percepción remota utilizadas en estos proyectos están centradas en los productos del sensor MODIS, que es el principal instrumento a bordo de dos plataformas del programa Earth Observing System (EOS/NASA): Terra y Aqua (ver capítulos I y II). La potencialidad de uso de los datos MODIS como indicador de la caracterización del paisaje forestal y su dinámica está esencialmente relacionada a su alta resolución temporal debido a la amplia franja de barrido (2,330 km). La disponibilidad de múltiples bandas espectrales favorece la indicación y la delineación de cambios de uso y cobertura del suelo, así como la detección de áreas quemadas.

Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es presentar los procedimientos empleados en la detección operacional de deforestación en el proyecto DETER y de

áreas quemadas en el proyecto DETEQ, en tiempo casi real, utilizando los productos del sensor MODIS en la vasta región Amazónica Brasileña.

ÁREA DE ESTUDIO

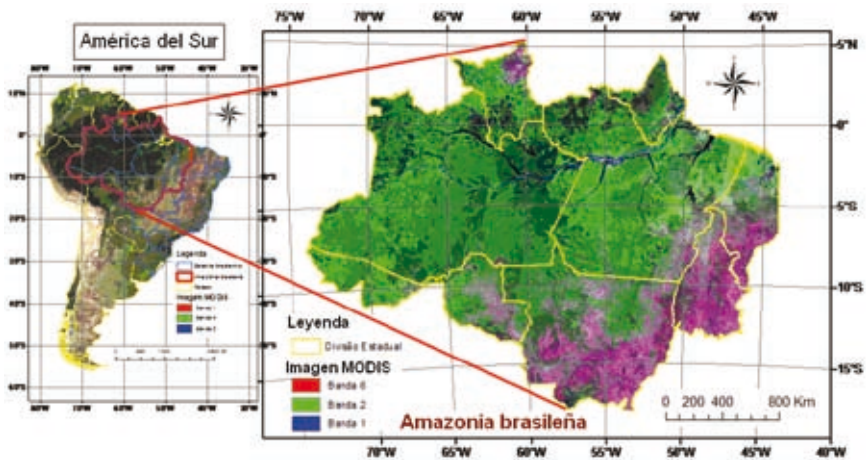
La Amazonía Legal (AML), unidad administrativa de Brasil, engloba los estados de Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, y parte del Estado de Maranhão (a oeste del meridiano 44° W), y tiene en total alrededor de 5,000.000 km² (IBGE, 2000) situados entre 5° N y 20° S (latitud) y 44° W y 75° W (longitud). La AML está incluida en la cuenca del río Amazonas, con excepción de la región sur del Estado de Mato Grosso, que está integrada a la cuenca del río Paraguay, y de parte del Estado de Maranhão, que pertenece a la cuenca del río Parnaíba (Figura 1).

METODOLOGÍA

Mapa de referencia de áreas deforestadas

El mapa base de referencia de las áreas deforestadas para los proyectos DETER y DETEQ ha sido obtenido a partir de los datos del Proyecto PRODES Digital del

FIGURA 1. MOSAICO DE IMÁGENES DEL SENSOR MODIS ADQUIRIDO EN EL PERÍODO DEL 12 AL 27 DE JULIO DE 2007, R (INFRARROJO MEDIO - MIR), G (INFRARROJO PRÓXIMO - NIR) Y B (ROJO - Red), DONDE SE MUESTRA EL ÁREA DE ESTUDIO DE LOS PROYECTOS DETER Y DETEQ.



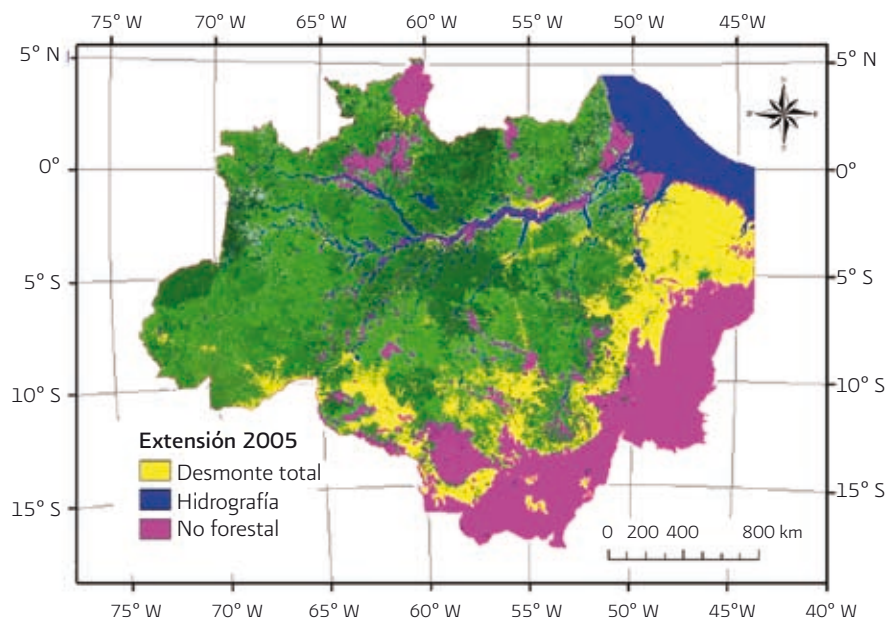
año anterior (<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>). Se adoptó este procedimiento para garantizar que áreas deforestadas en años anteriores no fuesen incluidas como nuevas deforestaciones en el año en estudio. Además, se utilizaron estas informaciones en el proyecto DETEQ para definir la cobertura vegetal en que ocurre la quemada.

Otro punto considerado fundamental en ese abordaje metodológico es la elaboración inicial de una máscara que contenga la separación entre áreas con y sin cobertura forestal. En el primer caso están comprendidas las tipologías de: a) selvas perennifolia densa y abierta de tierra firme, con o sin bambú y aquellas con palmas [e.g. con extensa ocurrencia de *babaçu* (*Orbignya martiana*)]; b) selvas de transición semicaducifolia y caducifolia; c) selvas periódica y permanentemente inundadas (várzeas e igapós, respectivamente); d) manglares; e) *campinaranas* arbóreas; y f) *cerradões*, entre otras. En el caso de áreas sin cobertura forestal insertadas en la región Amazónica, se encuentran las formaciones vegetales más semejantes a sabanas como Cerrado *lato sensu* (campo limpio, campo cerrado, campo rupestre, cerrado *strictu sensu*), *carrascos*, *campinaranas* de porte herbáceo arbustivo, campos de várzea, entre otras clases, así como formaciones urbanas y cuerpos de agua. Esa información es relevante para la comunidad científica que utiliza los datos en modelación de emisiones y reabsorción de carbono, ya que permite identificar con más precisión los límites de las formaciones forestales con mayor contenido de biomasa y de sus consecuentes pérdidas anuales en área en función de la expansión de la frontera agrícola. Con esa máscara se reduce la extensión analizada, pues contendrá solamente el área de formaciones forestales primarias (y/o aquellas donde el nivel de degradación, de bajo impacto, por ejemplo, no puede ser caracterizado espectralmente y/o espacialmente por el sensor utilizado) y de nuevas deforestaciones identificadas en la serie de datos procesados. En la Figura 2 se muestra el área de la Amazonía Legal sobrepuesta por la máscara generada a través de datos del PRODES Digital, como información inicial para las actividades de detección y monitoreo.

Banco de datos

Se generó una base de datos georreferenciada para toda la región de Amazonía Legal, en la proyección Policónica/SAD69. El área de trabajo está comprendida entre las coordenadas geográficas (44° 00' 00" W a 74° 00' 00" W) de longitud y (08° 00' 00" N a 20° 00' 00" S) de latitud. En esta base de datos, además de las

FIGURA 2. MOSAICO DE IMÁGENES DEL MODIS DE LA AMAZONÍA BRASILEÑA OBTENIDO DEL 13 AL 28 DE AGOSTO DE 2005, CON LA SUPERPOSICIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA DEFORESTACIÓN TOTAL HISTÓRICA PROVENIENTE DEL PROYECTO PRODES DIGITAL PARA LOS PROYECTOS DETER Y DETEQ DEL AÑO DE 2006



imágenes MODIS, también se incorporaron los mapas temáticos provenientes del PRODES Digital con las siguientes clases: selva, no selva, hidrografía y deforestación total. Este banco fue generado en el Sistema de Procesamiento de Informaciones Georreferenciadas (SPRING) desarrollado por la *Divisão de Processamento de Imagens* (DPI) del INPE (<http://www.dpi.inpe.br/spring/>).

Selección de las imágenes MODIS

La selección visual de las imágenes se basa esencialmente en la disponibilidad de imágenes libres de nubes. Las imágenes diarias (MOD09) del MODIS son capturadas de inmediato una vez que se hacen disponibles por la NASA. La disponibilidad de imágenes no tiene un plazo fijo y puede variar de 3 a 11 días después del paso del satélite. Las imágenes son liberadas en el formato HDF, en la proyección *integerized sinusoidal* y divididas en *tiles* (ver capítulo II). Luego de la adquisición de los *tiles* se

genera el mosaico de la Amazonía en el formato *geotiff* y así como una composición a color de baja calidad para el análisis preliminar de la cobertura de nubes. En seguida se seleccionan las imágenes de mejor calidad para verificar la presencia de pequeñas nubes que pueden interferir en la etapa de clasificación. Las imágenes diarias son prioritarias, ya que presentan mejor calidad visual que los mosaicos de 8 y de 16 días. Otro factor analizado tiene que ver con la centralidad del área de interés para evitar distorsión panorámica en los bordes de las imágenes (Figura 3).

La Tabla 1 presenta las imágenes MODIS seleccionadas en el período de enero de 2005 a agosto de 2006, con las fechas bases de las máscaras utilizadas en el año y utilizadas en el proyecto DETER.

Georreferenciamiento de las imágenes

Las imágenes utilizadas, ya georreferenciadas, son de reflectancia de superficie (productos MOD09) y pasan por diferentes niveles de procesamiento como descritos en el Capítulo 1.

FIGURA 3. FRANJA DE BARRIDO DE UNA IMAGEN DIARIA DEL MODIS (LÍNEA ROJA) DE 2,330 KM

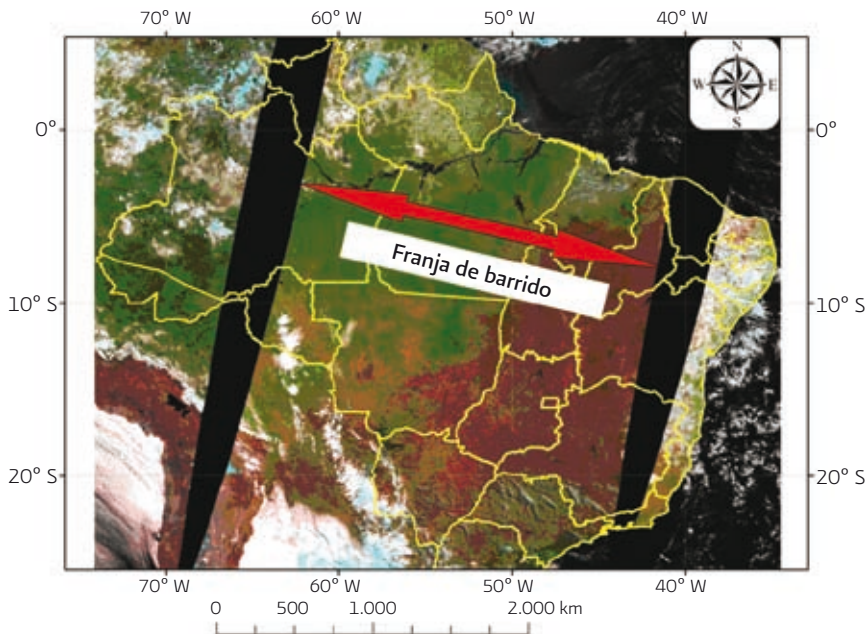


TABLA 1. IMÁGENES MODIS DIARIAS Y MOSAICOS DE 8 DÍAS ADQUIRIDOS EN EL PERÍODO DE ENERO DE 2005 A AGOSTO DE 2006.

Fecha base	Fechas de obtención de las imágenes MODIS
Agosto de 2004	25/01 al 01/02/2005 18/02 al 25/02/2005 22/03 al 29/03/2005 07/04 al 14/04/2005 13/04/2005 23/04 al 30/04/2005 12 y 30/06/2005 27 y 28/07/2005 28 y 29/08/2005 14, 15 y 20/09/2005 22 al 29/09/2005 10 y 19/10/2005 24 al 31/10/2005
Octubre de 2005	23 y 24 /01/2006 26/03/2006 27, 28, 29 y 30/04/2006 13 y 14/05/2006 23 y 24/06/2006 16 y 17/07/2006 14 y 15/08/2006

El procesamiento de datos MODIS se realiza por medio de programas de la NASA, siendo utilizadas las bandas 1 (rojo) y 2 (infrarrojo cercano), con resolución espacial de 250 m, y la banda 6 (infrarrojo medio), con resolución de 500 m interpolada para 250 m del producto MOD09.

La precisión de la georreferenciación prevista en la fase de lanzamiento del satélite es de aproximadamente 150 m, con el objetivo de reducir el error a 50 m en el nadir. Según Wolfe et al. (2002), después de 3 años de operación esa precisión gira en torno de 50 m para la plataforma Terra/MODIS y de 65 m para la plataforma Aqua/MODIS. Los programas utilizan datos de Modelo Digital de Elevación (MDE) para remover distorsiones producidas por el terreno. Con esta precisión las imágenes pueden ser incorporadas directamente en el ambiente computacional SPRING.

Procedimiento de clasificación

En esta sección se describe la metodología de clasificación de las imágenes utilizadas en los proyectos DETER y DETEQ, que tienen por base la experiencia adquirida en el proyecto PRODES Digital (Shimabukuro et al., 1998). Las etapas de este procedimiento consisten en el uso de modelo lineal de mezcla espectral, en la segmentación de las imágenes (fracción suelo – DETER y fracción sombra – DETEQ), en la clasificación no supervisada por regiones y en la edición de clasificación.

Aplicación del Modelo lineal de mezcla espectral

Para la etapa de clasificación de las imágenes MODIS, se aplica el Modelo lineal de mezcla espectral (MLME) con el propósito de generar las imágenes de la fracción de vegetación, suelo y sombra, permitiendo enfatizar los temas de interés y reducir el volumen de datos analizados.

La formulación matemática en que se fundamenta la técnica de mezcla espectral, dependiendo de las características específicas de los objetos en el terreno, puede ser lineal o no lineal. Sin embargo, sólo se considera la relación lineal para representar la mezcla espectral de los objetos dentro de un pixel. En este sentido, el valor de radiancia en cada pixel y en cualquier longitud de onda del espectro electromagnético (banda espectral) puede ser imaginado como una combinación lineal de las radiancias de cada componente presente en la mezcla (Shimabukuro y Smith, 1991; Aguiar et al., 1999). De esta manera, cada pixel de la imagen, que puede presentar cualquier valor dentro de la escala de nivel de gris (2^n bits), contiene información sobre la proporción (cantidad) y la radiancia espectral de cada componente dentro de la unidad de resolución en el terreno. Por lo tanto, para cualquier imagen multispectral generada por cualquier sensor (e.g. Landsat MSS, TM, ETM+, Terra/MODIS), considerando el conocimiento de la proporción de los componentes, se hace posible estimar las radiancias espectrales de cada uno de esos componentes. Similarmente, si las radiancias espectrales de los componentes son conocidas, entonces la proporción de cada componente en la mezcla puede ser estimada. El modelo de mezcla espectral puede ser escrito como:

$$\begin{aligned} r_1 &= a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n + e_1 \\ r_2 &= a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n + e_2 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned}$$

$$m = a_{m1} + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + e_m \quad (1)$$

donde:

- r_i - la reflectancia espectral media para la i -ésima banda espectral;
- a_{ij} - la reflectancia espectral de la j -ésima componente en el píxel para la i -ésima banda espectral;
- x_j - el valor de proporción de la j -ésima componente en el píxel;
- e_i - el error para la i -ésima banda espectral;
- $j = 1, 2, \dots, n$ (n = número de componentes asumidos para el problema);
- $i = 1, 2, \dots, m$ (m = número de bandas espectrales para el sistema sensor).

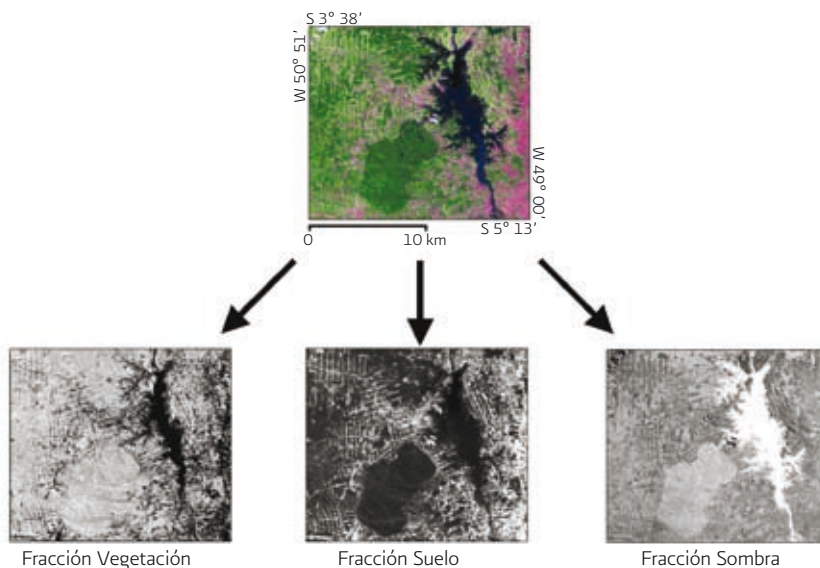
El modelo asume que las radiancias espectrales de los píxeles son combinaciones lineales de las radiancias espectrales de los componentes dentro del píxel. Para resolver este modelo, es necesario tener la reflectancia espectral compuesta para el píxel (r_i) y la reflectancia espectral de cada componente (a_{ij}) si los valores de proporción van a ser estimados, o viceversa.

Las imágenes fracción (Figura 4) son los productos generados por los algoritmos de los modelos de mezcla espectral (Shimabukuro y Smith, 1991). Normalmente se generan las imágenes fracción de vegetación, suelo y sombra, que están generalmente presentes en cualquier imagen. Las imágenes fracción pueden ser consideradas como un modo de reducción de la dimensionalidad de los datos y también como una forma de realzar las informaciones. Igualmente, el modelo de mezcla espectral transforma la información espectral en información física (valores de proporción de los componentes en el píxel). La imagen fracción vegetación realza las áreas con cobertura vegetal y la imagen fracción suelo realza las áreas con suelo desnudo, mientras que la imagen fracción sombra realza las áreas ocupadas con cuerpos de agua (ríos, lagos etc.) y áreas quemadas, inundadas, etc.

Segmentación de las imágenes: Fracción Suelo (DETER) y Fracción Sombra (DETEQ)

Para la clasificación de nuevas áreas deforestadas en el proyecto DETER se utilizó la imagen fracción suelo (Shimabukuro et al., 1998), mientras que para la clasificación de áreas quemadas en el proyecto DETEQ se utilizó la imagen fracción sombra (Shimabukuro et al., 2009). La clasificación de las imágenes se hizo de

FIGURA 4. EJEMPLO DE IMÁGENES FRACCIÓN VEGETACIÓN, SUELO Y SOMBRA, GENERADAS A PARTIR DEL PRODUCTO MOD09 DEL 17 DE JULIO DE 2005



manera no supervisada, por medio del algoritmo ISOSEG. Antes de la clasificación se hizo una segmentación de la imagen fracción suelo o fracción sombra por medio del método de crecimiento de regiones para generar polígonos espectralmente homogéneos. El empleo de ese método requiere la definición de dos umbrales: a) el umbral de similitud, umbral mínimo por abajo del cual dos regiones son consideradas similares y agrupadas en una única región; y b) el umbral de área, valor mínimo de área dado en número de píxeles, para que una región sea individualizada. Se definieron los umbrales 8 (similitud) y 4 (área) tomando en cuenta la complejidad de forma, dimensión y tipo de desmontes (DETER) y de áreas quemadas (DETEQ).

Clasificación no supervisada por regiones

Una vez realizada la segmentación, el siguiente paso fue crear un archivo de contexto, donde se almacenaron las siguientes informaciones: a) tipo de clasificación por regiones; b) bandas o imágenes utilizadas; e c) imagen segmentada. En seguida se hizo la extracción de las regiones, cuyo algoritmo extrae los atributos estadísticos (promedios y matrices de covariancia) del conjunto de regiones definido en

la fase de segmentación. Una vez realizada la extracción de regiones, se aplicó la clasificación no supervisada por medio del clasificador ISOSEG. Dicha clasificación se basa en un umbral de aceptación, que puede asumir cualquier valor fijado por el analista de datos. En general, se aplicó la clasificación con un umbral de aceptación de 95%, aunque éste no debe ser fijo ya que depende de cada caso en particular.

Luego de la clasificación de la imagen segmentada se hizo la rotulación de los polígonos que consiste en asociar cada una de las clases temáticas a una categoría de uso y ocupación del suelo. Las clases temáticas fueron definidas anteriormente en la base de datos digitales de Amazonía en: forestal, no forestal, hidrografía, deforestación total, deforestación diaria, deforestación mensual y áreas quemadas.

Edición matricial

Esta etapa del procedimiento minimiza los errores de inclusión y omisión inherentes a la clasificación automática de imágenes, mejorando la calidad de la información mediante la intervención del especialista en fotointerpretación y asegurando el resultado de un mapa confiable de las áreas deforestadas (DETER) y quemadas (DETEQ). Esta etapa fue realizada por un fotointérprete experto en la fisionomía, estructura y fenología de la cobertura forestal investigada y con conocimiento de campo para reconocer los patrones y relaciones de contexto de la actividad humana que ocurren en las diferentes tipologías forestales. La edición matricial se hizo directamente en la pantalla de la computadora, corrigiendo el atributo y/o los límites de los polígonos clasificados erróneamente. Se hizo la verificación de los polígonos clasificados utilizando como superficie de fondo una composición a color (b6 (R), b2 (G) y b1 (B)) debajo del mapa temático.

Diagrama de flujo de los proyectos

La Figura 5 presenta una síntesis metodológica de la puesta en operación del proyecto DETER, teniendo como base las imágenes MODIS y una base de datos georreferenciados en el ambiente computacional del programa SPRING.

En las figuras 6 y 7 se presentan los diagramas de flujo de los procedimientos efectuados en los proyectos DETER y DETEQ, respectivamente.

FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO DE ACTIVIDADES OPERACIONALES DEL PROYECTO DETER

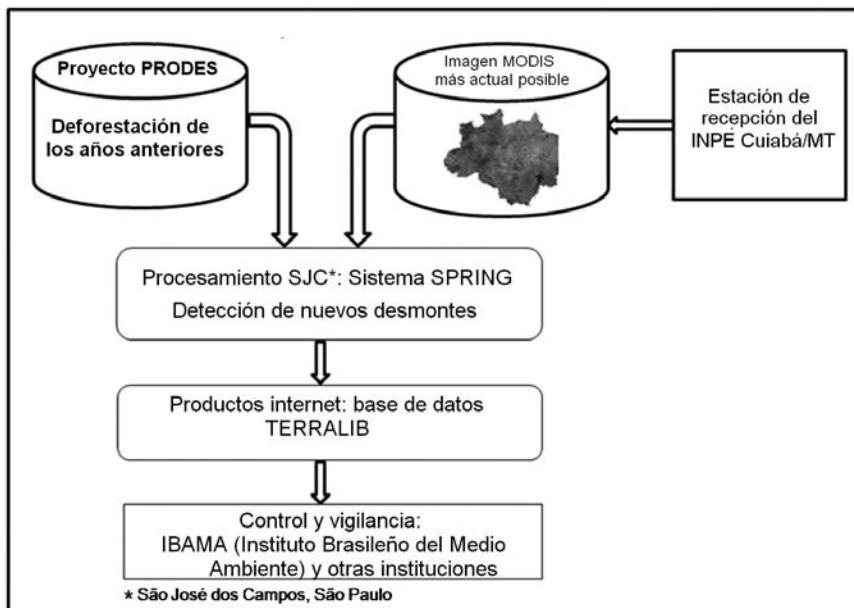


FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO DE DETECCIÓN DE ÁREAS DEFORESTADAS-DETER

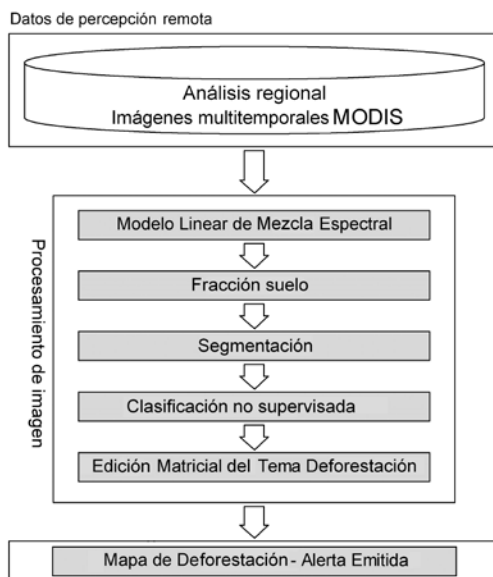
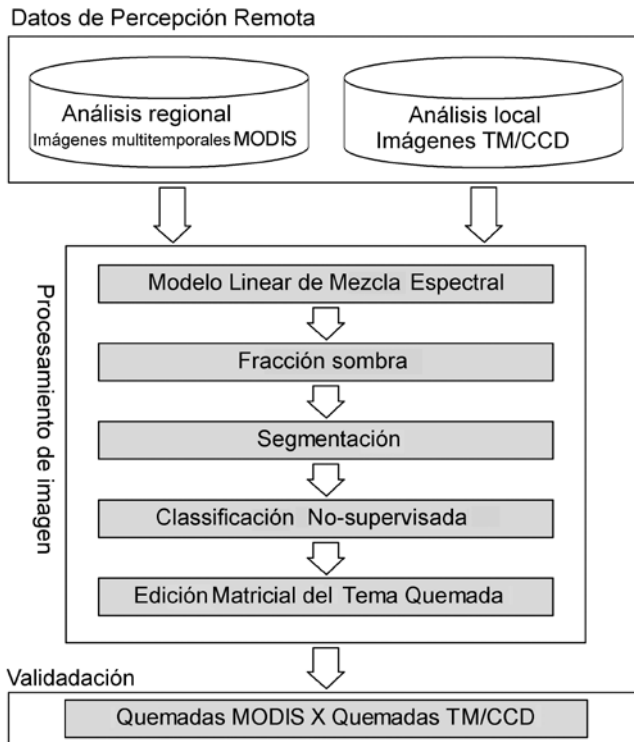


FIGURA 7. DIAGRAMA DE FLUJO DE MAPEO DE ÁREAS QUEMADAS-DETEO



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Detección de áreas deforestadas - DETER

Los resultados se refieren al período de enero de 2005 a agosto de 2006 (Tabla 1) y se presentan en la Figura 8 (enero a octubre de 2005) y en la Figura 9 (enero a octubre de 2006).

Analizando los datos de las Figuras 8 y 9, se observa una disminución del área deforestada en la Amazonía brasileña, entre los años de 2005 y 2006, de 8,856 km² a 5,035 km², respectivamente.

La Figura 10 muestra un detalle de los resultados del DETER indicando las clases de cobertura presentes con énfasis en las áreas detectadas, como nuevos

FIGURA 8. DEFORESTACIÓN OBSERVADA POR EL DETER ENTRE ENERO Y OCTUBRE DE 2005

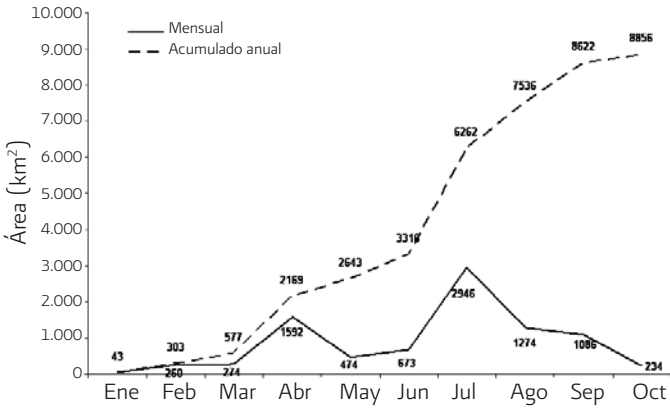
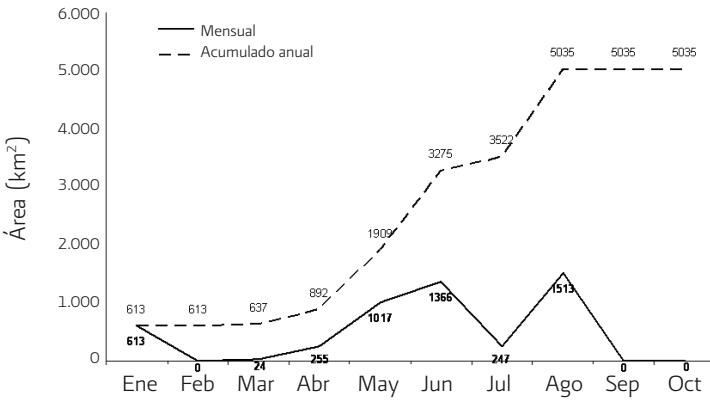


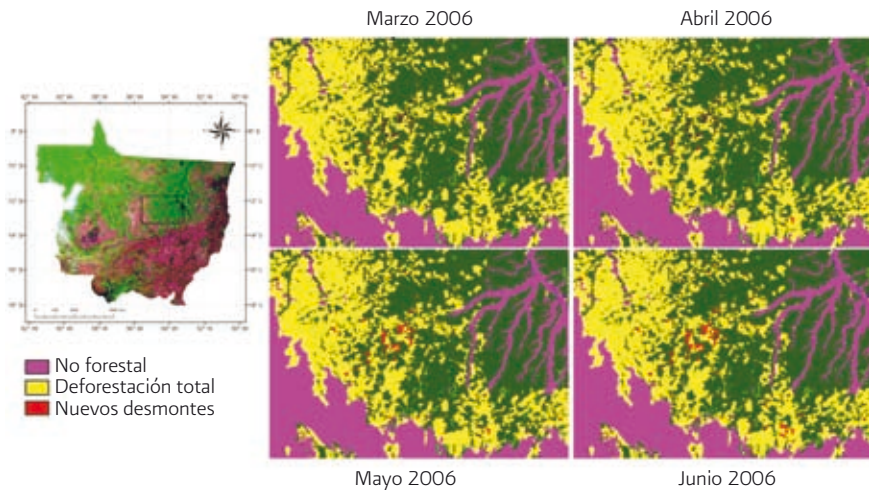
FIGURA 9. DEFORESTACIÓN OBSERVADA POR EL DETER ENTRE ENERO Y OCTUBRE DE 2006



desmontes, representadas por el color rojo en los mapas temáticos. Estos resultados se encuentran disponibles en <http://www.obt.inpe.br/deter/>.

Es importante mencionar que los valores de las áreas deforestadas presentados en las Figuras 8 y 9 deben servir apenas como indicativo del avance de la deforestación de nuevas áreas, ya que se hicieron las estimaciones con imágenes de resolución espacial moderada (250 m). En el caso de necesitar obtener un valor preciso del área deforestada, se recomienda el uso de imágenes con mejor resolución espacial (e.g. TM/Landsat y/o CCD/CBERS).

FIGURA 10. EVOLUCIÓN DE LA DEFORESTACIÓN EN LA AMAZONÍA LEGAL ENTRE MARZO Y JUNIO DE 2006



Mapeo de áreas quemadas-DETEQ

A continuación se presentan los primeros resultados del proyecto DETEQ para el Estado de Acre referentes al análisis utilizando los productos MOD09 adquiridos el 05 y el 15 de septiembre de 2005, y el 12 y el 21 de octubre de 2005. Las bandas del sensor MODIS utilizadas para la obtención de la imagen fracción sombra fueron: rojo (centrada en 640 nm); infrarrojo cercano (centrada en 858 nm); e infrarrojo medio (centrada en 1640 nm).

Para orientación inicial de la fase interpretativa de las quemadas en las imágenes MODIS se utilizaron las informaciones provenientes del proyecto PROARCO, que hace el monitoreo diario de focos de calor (<http://www.cptec.inpe.br/queimadas/>). Tal proyecto provee una base georreferenciada de focos de calor con sus distribuciones espacio-temporales. Para la ejecución del proyecto DETEQ se utilizaron los datos tanto para la determinación del período a ser analizado (época de mayor incidencia de focos de quemada) como para el posterior reconocimiento de las cicatrices de quemada. Se realizó la validación del mapeo de las áreas quemadas en parte del Estado de Acre con imágenes de mejor resolución espacial (CBERS-2/CCD y Landsat/TM adquiridos el 12 y el 13 de octubre de 2005, respectivamente), y también con informaciones de campo.

La Figura 11 presenta la composición a color R (banda 6, infrarrojo medio - MIR), G (banda 2, infrarrojo próximo - NIR) y B (banda 1, rojo - Red) y las imágenes fracción individuales de vegetación, suelo y sombra referentes a la imagen MODIS adquirida el 12 de octubre de 2005. Las áreas quemadas pueden ser identificadas en la imagen fracción sombra por presentar niveles de gris más altos que los otros objetos, lo que facilita su mapeo.

Se mapearon, a través del análisis temporal de las imágenes fracción sombra, 6,500 km² de área quemada en el Estado de Acre. De este total, 3,700 km² correspondieron a las áreas que fueron previamente deforestadas, donde la actividad de quema sirve como práctica tradicional de limpieza del terreno para establecer cultivos, nuevos pastizales o como práctica de mejoría de las condiciones de pastoreo. Otros 2,800 km² correspondieron a las áreas de incendios forestales, tanto a nivel de superficie como de dosel. La incidencia del fuego sin control sobre la cobertura forestal es determinada principalmente por la acción de vientos, la disponibilidad de materia seca en el interior de la selva y la ocurrencia de determinadas especies más susceptibles al fuego (Figura 12).

FIGURA 11. IMAGEN DEL ESTADO DE ACRE ADQUIRIDA POR EL SENSOR MODIS EL 12 DE OCTUBRE DE 2005: (A) COMPOSICIÓN COLORIDA (R6, G2, B1); (B) IMAGEN FRACCIÓN VEGETACIÓN; (C) IMAGEN FRACCIÓN SUELO; E (D) IMAGEN FRACCIÓN SOMBRA

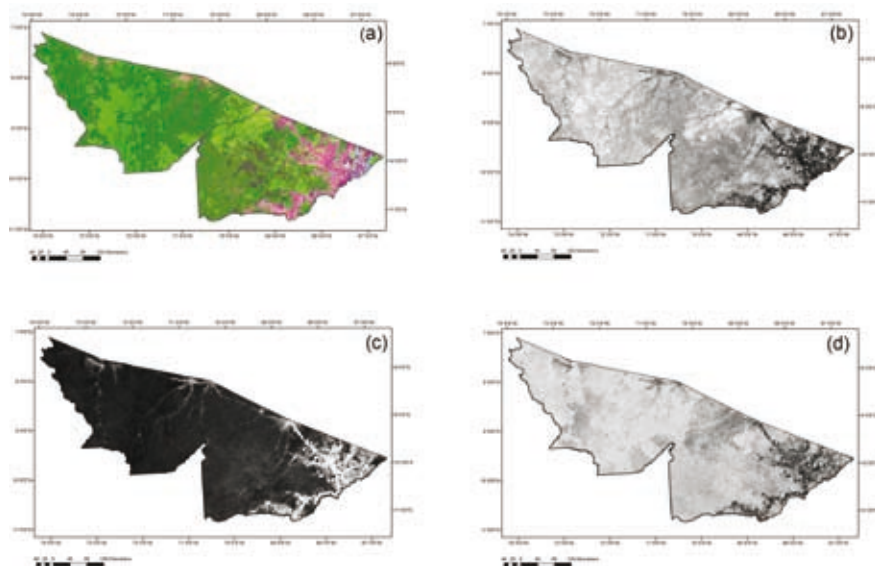
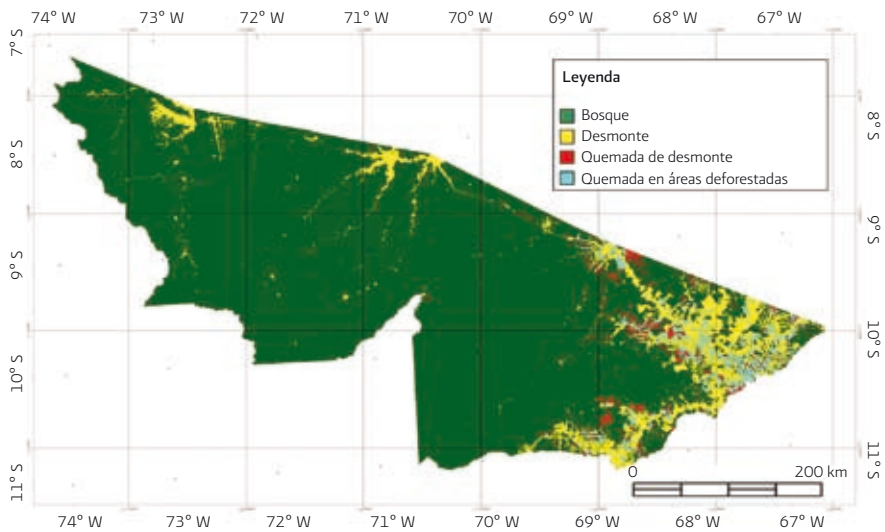


FIGURA 12. ÁREAS QUEMADAS EN EL ESTADO DE ACRE IDENTIFICADAS EN LAS IMÁGENES MODIS (FRACCIÓN SOMBRA) ADQUIRIDAS EN EL AÑO DE 2005



Preocupados por el nivel de emisiones derivados de la quema y sus impactos en la calidad del aire respirado por la población del Estado de Acre, Brown et al. (2006) estimaron, a través de las imágenes Landsat/TM y CBERS 2/CCD y de un detallado trabajo de campo, que más de 2,670 km² de selvas primarias fueron afectados por quemadas en el sureste del estado en el año de 2005. Este resultado confirma la consistencia de la estimación realizada por el DETEQ, indicando el posible uso de las imágenes MODIS para el mapeo operacional de áreas quemadas en escala regional.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN

Los resultados alcanzados en los proyectos DETER y DETEQ indican que las imágenes adquiridas por el sensor MODIS pueden ser utilizadas de modo operacional tanto para detectar áreas deforestadas como para mapear áreas de quema. El costo es relativamente bajo, pues las imágenes son gratuitas y pueden ser procesadas por un pequeño grupo de analistas.

Sin embargo, es importante resaltar que el DETER no sustituye el PRODES Digital, que identifica y mapea las áreas deforestadas con imágenes de resolución

espacial media (e.g. TM/Landsat) para fines de evaluación precisa del área anualmente deforestada. El DETER monitorea la AML para detectar periódicamente los desmontes utilizando la alta resolución temporal de las imágenes MODIS. Por lo tanto, presenta una limitación para estimar de modo preciso el área deforestada debido a la resolución espacial moderada del MODIS. Así, se puede concluir que estos proyectos pueden ser ejecutados de manera complementaria. El DETER monitorea la acción humana y puede indicar dónde y cuándo está ocurriendo, mientras que el PRODES provee la tasa anual de deforestación.

En lo que se refiere al proyecto DETEQ, su futura implementación podrá reducir las incertidumbres relacionadas con la cuantificación de áreas quemadas en escala regional, en comparación con otros métodos de evaluación sistemática basados en focos de calor (Arino y Rosaz, 1999; Justice et al., 2002; Giglio et al., 2003; Setzer et al., 2007). Asimismo, el DETEQ podrá brindar informaciones cuantitativas para evaluar mejor la contribución de Brasil a las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la quema de selvas. También podrá permitir la aplicación de políticas de monitoreo, control y vigilancia de quemadas ilegales en Amazonía.

REFERENCIAS

- Aguar, A.P.D., Shimabukuro, Y.E. & Mascarenhas, N.D.A. (1999) Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 647-657
- Arino, O.; Rosaz, J., 1999. 1997 and 1998 world ATSR fire atlas using ERS-2 ATSR-2 data, Proceedings of the Joint Fire Science Conference, Boise, Idaho, 15-17 Junho 1999: Neuenschwander, L. F., Ryan, K. C., and Golberg, G. E., Boise: University of Idaho and the International Association of Wildland Fire, 177-182.
- Bierregaard, R.O., Lovejoy, T.E., Kapos, V., Dossantos, A.A. & Hutchings, R.W. (1992) The biological dynamics of tropical rain-forest fragments. *Bioscience*, 42, 859-866
- Fearnside, P.M. (2005) Deforestation in brazilian amazonia: History, rates, and consequences. *Conservation Biology*, 19, 680-688.
- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2000. Atlas Nacional do Brasil, 3rd edn, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 262 p.
- Giglio, L., Kendall, J.D. & Mack, R. (2003) A multi-year active fire dataset for the tropics derived from the trmm vrs. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 4505-4525.

- Hogan, D.J., Cunha, J.M.P. & Carmo, R.L. (2002) Uso do solo e mudança de sua cobertura no centro-oeste do brasil: Conseqüências demográficas, sociais e ambientais. *Migração e ambiente no centro-oeste* (ed. by D.J.C. Hogan, R.L. Cunha, J.M.P. Baeninger, R.), pp. 147-174. NEPO/UNICAMP, Campinas.
- Houghton, R.A., Skole, D.L., Nobre, C.A., Hackler, J.L., Lawrence, K.T. & Chomentowski, W.H. (2000) Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the brazilian amazon. *Nature*, 403, 301-304.
- Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J.T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F. & Kaufman, Y. (2002) The modis fire products. *Remote Sensing of Environment*, 83, 244-262
- Morton, D.C., Defries, R.S., Shimabukuro, Y.E., Anderson, L.O., Arai, E., Espirito-Santo, F.D., Freitas, R. & Morisette, J. (2006) Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern brazilian amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103, 14637-14641.
- Nepstad, D.C., Decarvalho, C.R., Davidson, E.A., Jipp, P.H., Lefebvre, P.A., Negreiros, G.H., Dasilva, E.D., Stone, T.A., Trumbore, S.E. & Vieira, S. (1994) The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of amazonian forests and pastures. *Nature*, 372, 666-669.
- Setzer, A., Morelli, F. & Rivera-Lombardi, R. (2007) Estimativa quinzenal de áreas queimadas. *O sensor modis e suas aplicações ambientais no brasil* (ed. by B.F.T. Rudorff, Y.E. Shimabukuro e J.C. Ceballos), pp. 403-415. Book Image, São José dos Campos.
- Shimabukuro, Y.E. & Smith, J.A. (1991) The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote-sensing multispectral data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29, 16-20.
- Shimabukuro, Y.E., Batista, G.T., Mello, E.M.K., Moreira, J.C. & Duarte, V. (1998) Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in landsat thematic mapper images of the amazon region. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 535-541.
- Shimabukuro, Y.E., Duarte, V., Moreira, M.A., Arai, E., Valeriano, D.M., Anderson, L.O., Espírito-Santo, F.D.B. (2007) Desflorestamento na Amazônia - Sistema DETER. *O sensor modis e suas aplicações ambientais no brasil* (ed. by B.F.T. Rudorff, Y.E. Shimabukuro e J.C. Ceballos), pp. 389-401. Book Image, São José dos Campos.
- Shimabukuro, Y.E., Duarte, V., Arai, E., Freitas, R.M., Lima, A., Valeriano, D.M., Brown, I.F. & Maldonado, M.L.R. (2009) Fraction images derived from terra modis data for mapping burnt areas in brazilian amazonia. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 1537-1546.

- Uhl, C., Buschbacher, R. & Serrao, E.A.S. (1988) Abandoned pastures in eastern amazonia .1. Patterns of plant succession. *Journal of Ecology*, 76, 663-681.
- Uhl, C. & Kauffman, J.B. (1990) Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern amazon. *Ecology*, 71, 437-449.
- Vitousek, P.M. (1994) Beyond global warming - ecology and global change. *Ecology*, 75, 1861-1876.
- Wolfe, R.E., Nishihama, M., Fleig, A.J., Kuiper, J.A., Roy, D.P., Storey, J.C. & Patt, F.S. (2002) Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of modis land science. *Remote Sensing of Environment*, 83, 31-49.
- Wright, I.R., Gash, J.H.C., Darocha, H.R., Shuttleworth, W.J., Nobre, C.A., Maitelli, G.T., Zamparoni, C. & Carvalho, P.R.A. (1992) Dry season micrometeorology of central amazonian ranchland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 118, 1083-1099.

CAPÍTULO 6

Sistema de alerta temprana para incendios forestales en México

María Isabel Cruz López, Gerardo López Saldaña, Rainer Ressler, René Colditz

RESUMEN

1998 fue uno de los años con mayor incidencia de incendios forestales en México, los cuales provocaron severos daños en áreas naturales y en la biodiversidad. Con este antecedente, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) implementó en 1999 un programa para la detección de puntos de calor utilizando imágenes de satélite, distribuyendo en tiempo casi real los resultados en su página web. El objetivo del programa es proporcionar información oportuna para la prevención y combate de incendios forestales para México y Centro América.

Actualmente el programa se encuentra en proceso de ampliación para convertirse en un sistema de información para incendios, utilizando imágenes de satélite MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), constituido por tres etapas: 1) alerta temprana, conformado por un índice de propagación de incendios, basado en la comparación de datos históricos de índices de vegetación y el índice actual; 2) monitoreo, se publica diariamente la ubicación de los puntos de calor detectados, y 3) impacto, evaluación rápida de las áreas afectadas, aplicando algoritmos de identificación de áreas quemadas. En este capítulo se proporcionará un panorama general sobre los principales componentes del sistema, así como los algoritmos desarrollados y aplicados.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En el mundo la presencia de incendios forestales ha contribuido al deterioro de recursos naturales, pérdidas económicas (directas o indirectas) y vidas humanas. En México esta situación no es la excepción, de acuerdo con las condiciones climáticas y meteorológicas, cada año se presentan incendios forestales de diversas magnitudes. De 1970 a 2005, han ocurrido en promedio 6,782 incendios forestales, con una superficie afectada promedio de 220,548 hectáreas (CONAFOR, 2006).

En el año de 1998 se registró la temporada con mayor presencia de incendios en México registrando más de 14,000 incendios forestales (CONAFOR, 2006). Este año fue considerado atípico en la historia, dado que se presentaron condiciones climatológicas extremas que imperaron en México y en el mundo, tales como sequía prolongada y elevadas temperaturas ambientales que favorecieron condiciones propicias para la existencia de una cantidad excesiva de incendios con impactos catastróficos (CONAFOR, 2008). La temporada de incendios de 1998 tuvo como origen las condiciones de sequía que se habían presentado desde el invierno de 1997, así como el retraso de la temporada de lluvia de 1998, que se recorrió de mayo hasta finales de junio (Palacio *et al.*, 1999). Como consecuencia de la presencia del fenómeno de El Niño, también llamado El Niño - Oscilación del Sur (ENOS), considerado como uno de los más intensos del siglo pasado (Magaña, 1999; Manzo *et al.*, 2004; González, 2008).

Los incendios afectan de diferente forma a los diversos ecosistemas forestales, dependiendo de la intensidad y duración del fuego, así como de las condiciones bajo las cuales se presentan, tanto atmosféricas como de suelo, topográficas o de la propia vegetación.

Los efectos causados por los incendios a los ecosistemas forestales tienen diversas manifestaciones y no necesariamente son negativos. Entre los efectos benéficos se mencionan que después del incendio se propicia el rebrote de pasto tierno que sirve para la alimentación del ganado y de la fauna silvestre, se facilita la germinación de las semillas de algunas especies de árboles, se abate el combustible ligero (pastos, hojarasca, hierbas, etcétera), se controlan ciertas plagas, enfermedades y vegetación indeseable, se incorporan nutrientes al suelo y se evita o disminuye la presencia de incendios de grandes magnitudes (CONAFOR, 2006 y Rodríguez, 2006). En contraste, los efectos negativos incluyen la destrucción

de madera, la erosión del suelo, la falta de retención de agua y la destrucción del hábitat de la fauna silvestre, por mencionar los más importantes.

La tecnología de percepción remota, principalmente a través de imágenes de satélite, ayuda a proporcionar información que contribuye a la prevención, el monitoreo y el combate de los incendios forestales.

En México se analizó la situación de los incendios ocurridos en 1998, utilizando diferentes imágenes de satélite, como (*Defense Meteorological Satellite Program - Operational Linescan System*) (DMSP-OLS) empleadas por la CONABIO (1998a), *National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer* (NOAA-AVHRR) empleadas por Palacio *et al.* (1999), Galindo (2002), y Ortíz *et al.* (2003), o imágenes GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) empleadas por Montero *et al.* (2004) o el Servicio Meteorológico Nacional (2009).

Hoy en día varios sistemas en el mundo están monitoreando incendios forestales en forma operacional utilizando sensores remotos como DMSP-OLS, NOAA-AVHRR y como el más importante MODIS-Terra y Aqua. Por ejemplo: el *Canada Centre for Remote Sensing* (CCRS) y el *Canadian Forest Service* (CFS) operan un sistema de monitoreo de incendios para todo el país de Canadá (CFS, 2008; Li *et al.*, 2000). Otro sistema es operado en Australia por el *Department of Land Information* (DLI; Landgate, 2008) y el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* de Brasil genera y proporciona información a los países de Sudamérica (INPE, 2008).

En México el programa para la detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota, tiene su antecedente en el año de 1998, cuando la información generada a partir de las imágenes de satélite DMSP-OLS contribuyó en la definición de las áreas dañadas por los incendios forestales que requerían ser restauradas. Es a partir de 1999 cuando la CONABIO implementó el programa usando imágenes NOAA-AVHRR, proporcionadas por el Instituto de Geografía de la UNAM, en forma semi-automática, para derivar información sobre la ocurrencia de incendios forestales.

A partir de 2000 fue automatizado totalmente el proceso de obtención y manejo de la información para la detección de los incendios dos veces al día, bajo la supervisión y revisión manual de la calidad de los resultados por parte de un analista. El tiempo de respuesta se redujo con la adquisición de una estación receptora en la CONABIO al final del año 2000, para recibir datos de NOAA-AVHRR en forma directa (*Direct readout*). A final del año 2001 se complementó el sistema con una

antena receptora de banda X, para recibir datos del sensor Terra, los cuales ayudaron a proporcionar información con mayor confiabilidad y en casi tiempo real.

Los componentes del programa han aumentado y se observa una mejora continua en el tiempo de respuesta, calidad y complejidad de información. A parte de la ubicación geográfica del incendio, se caracteriza el punto de calor según el tipo de vegetación afectada, el municipio y el estado correspondiente, así como si se ubica en un área natural protegida y la inclinación del terreno.

A partir del año 2003 la CONABIO empezó a brindar información sobre posibles incendios forestales a los países de Centro América en forma gratuita, ya que la cobertura de la estación de recepción de la CONABIO también cubre los países de América Central hasta Panamá y la zona del Caribe.

Actualmente la CONABIO está desarrollando un sistema integral para la alerta temprana, monitoreo y análisis de incendios forestales. El sistema estará conformado por tres componentes asociados a las etapas de la gestión de riesgo: antes (alerta temprana), durante (monitoreo) y después (identificación de áreas quemadas).

SISTEMA DE RECEPCIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE MODIS EN LA CONABIO

La Conabio, en sus instalaciones en la Ciudad de México, cuenta con la antena y el equipo necesario para recibir y procesar los datos MODIS transmitidos desde los satélites Terra y Aqua. El área total observada por estos satélites, en su trayectoria con respecto a una estación de recepción, se le denomina círculo de recepción, como se muestra en la Figura 1.

Terra y Aqua vuelan a una altitud de 705 km sobre la Tierra, observan con pasos diarios la superficie total de la Tierra cada 1 a 2 días. Debido a la órbita polar de ambos satélites y la franja de observación (swath) del sensor MODIS que es de 2,330 km, permite observar durante cada órbita los polos, pero en un día no las latitudes comprendidas entre -30 y 30 grados para pasos diurnos o nocturnos como lo muestra la Figura 2 (ver también capítulo I).

Los componentes de la estación de recepción en la CONABIO son: 1) antena: da seguimiento al satélite y captura los datos que transmite; 2) una estación de trabajo, desde la cual se administran todos los recursos de la estación de recepción y 3) un receptor y demodulador para recibir la señal de los satélites en frecuencias específicas. Los satélites Terra y Aqua transmiten datos en diferentes frecuencias en la banda X.

FIGURA 1. CÍRCULO DE RECEPCIÓN DE LA ESTACIÓN DE RECEPCIÓN DE LA CONABIO

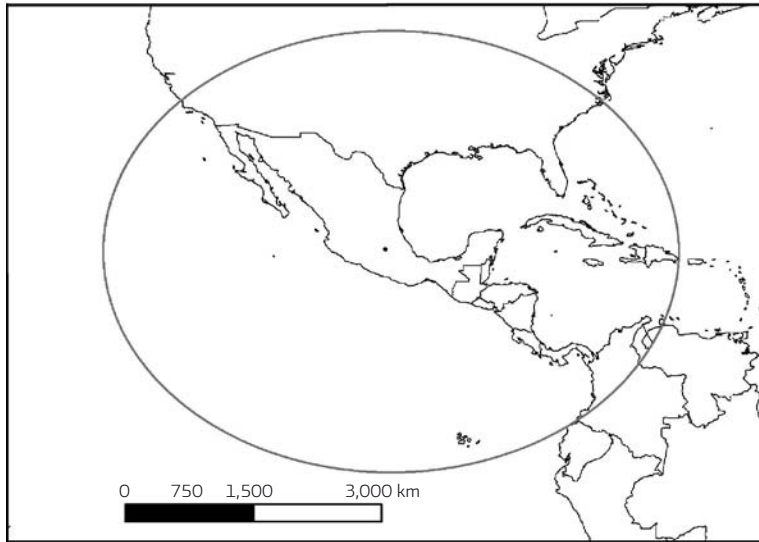
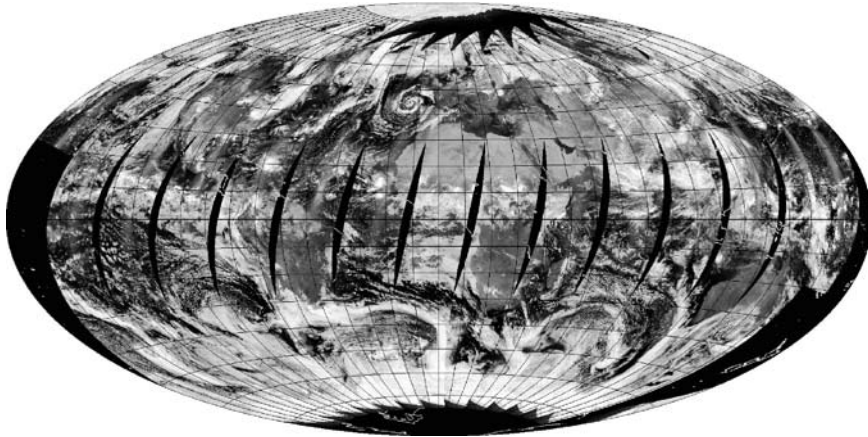


FIGURA 2. COBERTURA GLOBAL DE MODIS A BORDO DE TERRA, 23 DE AGOSTO DE 2003



El seguimiento que realiza la antena al satélite es controlado por un sistema que predice la posición del satélite en su órbita en un momento específico. Este sistema dirige la antena hacia un punto en el horizonte donde se espera que el satélite aparezca, la hora específica y la dirección u orientación se calculan a

partir de un conjunto de datos denominado elementos orbitales (proporcionados por los controladores de los satélites), que describen el movimiento de los satélites dentro de su órbita. Estos datos son actualizados regularmente para calcular el momento exacto cuando un satélite pasará dentro del círculo de recepción de la estación.

El área de estudio de la detección de incendios está definida por la disponibilidad de los datos que recibe la CONABIO, que depende básicamente de la localización geográfica del sistema de recepción, (ubicado en la Ciudad de México en los 19° 18' 3.6'' de latitud norte y 99° 11' 9.6'' de longitud oeste) y del círculo de recepción, como se observa en la Figura 1. Por lo anterior, el área de estudio se extiende desde el sur de los Estados Unidos hasta la frontera de Panamá con Colombia, cubriendo todo México y Centro América.

MÉTODOS

El método para el desarrollo de los componentes principales que conformarán el sistema de alerta temprana, monitoreo y evaluación se explicará en las siguientes secciones.

Las fases que actualmente se encuentran en operación dentro del programa para detección de puntos de calor son: la fase de alerta temprana (índice de propagación inciso b) y la fase de monitoreo con la detección de puntos de calor inciso a. El tercer componente (actualmente en desarrollo) es la identificación de área quemada del cual se presenta un caso específico.

Detección de incendios

En la detección de incendios forestales utilizando imágenes de satélite, es prioritario definir el concepto de punto de calor. La CONABIO considera como un punto de calor el pixel que reporta una temperatura elevada en comparación con sus vecinos y cumple con los umbrales establecidos en el algoritmo, que se explicará más adelante. El concepto está basado en la propuesta de Flasse y Ceccato (1996).

Bajo este concepto y el método utilizado para la detección, no es posible saber el número de incendios y su tamaño, debido a la saturación del pixel completo, que depende de la intensidad de la temperatura que emita la superficie y el diseño del sensor. Por lo tanto no se tiene la certeza que cada punto de calor corresponda a un incendio o una quema agrícola; así mismo, porque en el área que cubre un pixel

puede estar ocurriendo uno o más eventos que generan la suficiente temperatura para alcanzar los umbrales establecidos.

ALGORITMO

La CONABIO utiliza el algoritmo MOD14 thermal anomalies/fire, versión 4.3.2, desarrollado por la Universidad de Maryland y descrito por Giglio *et al.* (2003). El código fuente fue proporcionado por el *Direct Readout Lab* de la *NASA/University of Maryland* (2002) e implementado en la estación de recepción de imágenes MODIS que forma parte del programa para la detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota.

El algoritmo utiliza como datos de entrada el producto MODIS nivel L1B que contiene datos calibrados y con geolocalización; este producto incluye una corrección geométrica y radiométrica. Las características de las imágenes MODIS pueden consultarse en los dos primeros capítulos de este libro.

El algoritmo emplea las bandas 21 ó 22, ambas cubren parcialmente la región del infrarrojo medio, denominadas $BT_{21/22}$ y la banda 31 que registra parte del infrarrojo térmico, identificada como BT_{31} . Lo anterior permite aprovechar la diferencia de la respuesta espectral del fuego en el infrarrojo medio y el infrarrojo térmico (Giglio *et al.*, 2003). El infrarrojo medio es más sensible a los incendios con mayor temperatura (Justice *et al.*, 2006).

La banda BT_{21} se satura aproximadamente a los 500° K en comparación a la BT_{31} , la cual se satura a los 400° K. La saturación se refiere a la máxima temperatura de brillo que registran las imágenes de satélite. La saturación de la BT_{22} es a los 331 K, sin embargo se recomienda el uso de esta banda para obtener la temperatura de brillo debido a los errores más pequeños en la cuantización de los datos en comparación con BT_{21} y así introducir menor ruido. Se utiliza la banda BT_{22} cuando el nivel de saturación lo permite, en caso contrario se utiliza la banda BT_{21} (Giglio *et al.*, 2003).

En la detección de incendios son utilizadas todas las imágenes recibidas por la estación de recepción de la CONABIO a partir del nivel 1B, las cuales se clasifican en dos categorías: a) imágenes diurnas recibidas durante el día entre las 10:30 y las 12:30 horas (hora local) para Terra y entre las 13:30 y 15:30 para Aqua; b) imágenes nocturnas recibidas durante la noche entre las 21:30 y 23:30 para Terra y las 00:30 y 02:30 para Aqua. En promedio se reciben 6 imágenes diarias.

El algoritmo inicia con la eliminación de los píxeles considerados como datos nulos, nubes (identificadas como parte de este algoritmo) y cuerpos de agua (uti-

lizando una máscara de cuerpos de agua). Para identificar si un pixel corresponde a una nube, con imágenes diurnas, se utiliza la banda 32, identificada como BT_{32} y la información de reflectancia de las bandas 1 y 2, identificadas como B_1 y B_2 , que cubren la región del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Los umbrales empleados en todo el algoritmo pueden ser consultados en la figura 3. En la identificación de las nubes empleando las imágenes nocturnas es utilizada la temperatura del brillo.

El algoritmo identifica pixeles potenciales, de ser puntos de calor, en función de la temperatura de brillo en la banda $BT_{21/22}$ y la diferencia en las bandas $BT_{21/22}$ y BT_{31} . Los pixeles que no cumplen con la prueba establecida son eliminados de las siguientes pruebas y clasificados como puntos de no calor. Debido al gradiente de temperatura en la superficie terrestre entre el día y la noche los umbrales utilizados en el algoritmo son diferentes, como se pueden observar en la figura 3.

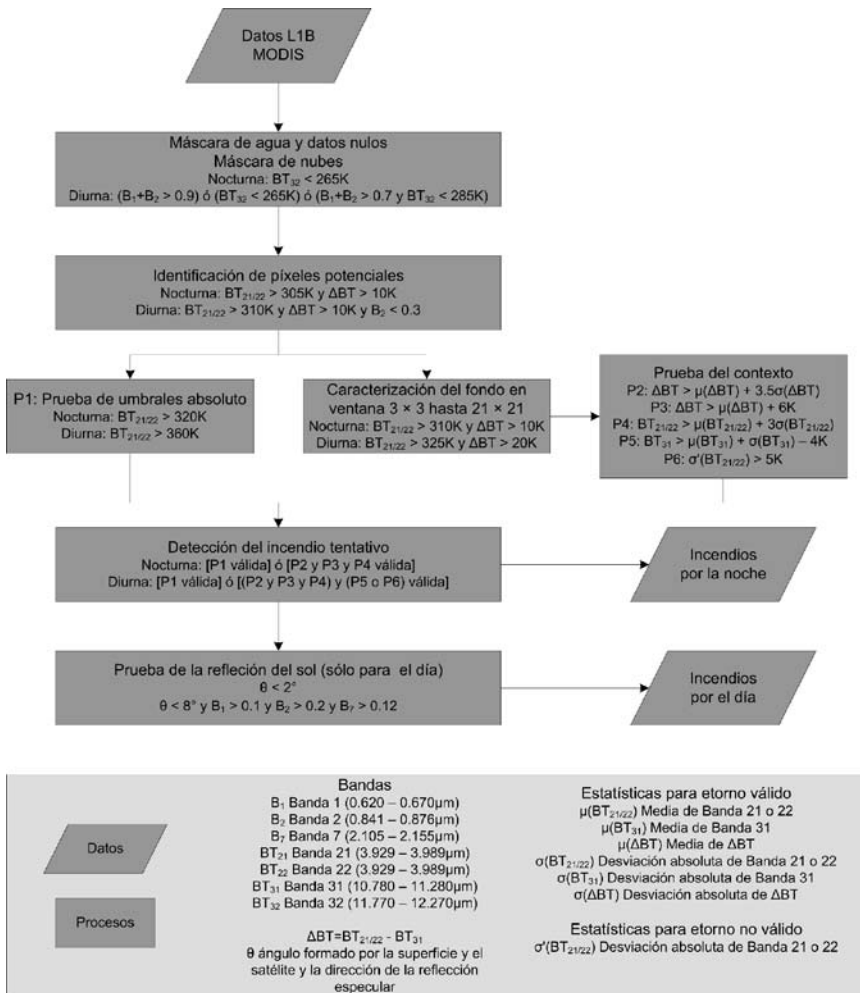
Las siguientes pruebas consisten en umbrales absolutos, que definen la temperatura mínima a considerar para un punto de calor o pruebas de contexto. Para aplicar las pruebas de contexto es necesario caracterizar el fondo que rodea al pixel potencial; con el objetivo de determinar la respuesta de la temperatura de brillo en ausencia de fuego. Para ello el algoritmo define los pixeles válidos que participarán en la caracterización del fondo, dentro de una ventana de 3 x 3 pixeles, utilizando como centro el pixel potencial de ser un punto de calor. Esta ventana incrementa como máximo hasta 21 x 21 pixeles, dicho incremento se detiene hasta alcanzar el máximo o antes si al menos el 25 % de los pixeles dentro de la ventana son considerados como válidos y el número de pixeles válidos son al menos ocho. Serán considerados como válidos los pixeles que no sean datos nulos, nubes, agua y que no sean definidos como puntos de calor del fondo. Las condiciones que deben de cumplir los pixeles para ser considerados como puntos de calor del fondo se muestran en la figura 3.

El conjunto de pixeles considerados como válidos se denomina "entorno válido". Una vez establecido el entorno válido, el algoritmo calcula la media y la desviación absoluta de las bandas $BT_{21/22}$, BT_{31} y de la diferencia de ambas.

Una vez caracterizado el fondo, el algoritmo aplica pruebas de contexto para diferenciar en forma relativa el punto de calor con los pixeles vecinos (Giglio *et al.*, 2003). Si el pixel cumple con las pruebas de contexto, entonces es considerado como punto de calor tentativo, en caso contrario es clasificado como punto de no calor.

La banda $BT_{21/22}$ de las imágenes diurnas puede estar fuertemente influenciada por reflexión de la luz solar de la superficie (sun glint, según Giglio *et al.*, 2003 y

FIGURA 3. ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE PUNTOS DE CALOR



Justice *et al.*, 2006), debido a esto el algoritmo original aplica tres pruebas para eliminar píxeles falsos, las cuales son: sun glint, el límite del desierto y la línea de costa. Sin embargo, la versión disponible del algoritmo en el sitio *web* del *Direct Readout Lab* (DRL) para procesamiento en estaciones de recepción aplica sólo la prueba de sun glint para eliminar puntos de calor falsos, debido al reflejo del sol generado por cuerpos de agua y algunas nubes.

El producto final del algoritmo es una imagen raster con las siguientes categorías: datos nulos, datos no procesados, agua, nubes, puntos de no calor y puntos de calor. Con base a este raster se obtienen las coordenadas geográficas de cada uno de los píxeles detectados como puntos de calor.

CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL SITIO Y GENERACIÓN DE PRODUCTOS AUXILIARES

Los sitios en los cuales se localizan los puntos de calor son caracterizados utilizando herramientas de sistemas de información geográfica. La caracterización tiene dos objetivos principales: el primero para ubicar geográficamente los posibles incendios forestales, al proporcionar las coordenadas geográficas de los píxeles detectados como puntos de calor e identificar la entidad federativa y municipio en el cual se localiza. Para ello se utiliza cartografía elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

El segundo para priorizar la atención del incendio, al utilizar información sobre el tipo de vegetación así como una sobre uso del suelo. Esta característica permite una primera aproximación en la discriminación de un posible incendio o quema agrícola. Cuando un punto de calor se ubica sobre vegetación primaria, se caracteriza conforme a la susceptibilidad de la vegetación a incendios (CONABIO, 1998b). Así mismo, se ubica al punto de calor con relación a las áreas naturales protegidas (ANP), con tres categorías: dentro de un ANP, dentro de un área de influencia de 5 km o fuera de dichas áreas. Se incluye la inclinación del terreno (pendiente) e información del índice de propagación de incendios. Esta última característica es estimada a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), que se explica más adelante. Como complemento de la caracterización del sitio, se generan en forma automática productos auxiliares que proporcionan información sobre la distribución espacial de los puntos de calor. Estos productos consisten en archivos shapefile con referencia geográfica (en formato de polígono y punto), archivos KML para visualizar los puntos de calor sobre el sistema "Google Earth" y vistas rápidas. Estas últimas corresponden a imágenes con diferentes temas como: la ubicación de cada punto de calor sobre un modelo digital del terreno y sobre el tipo de vegetación así como una vista rápida de la imagen MODIS utilizada en la detección y vista rápida de un mapa con la distribución de los puntos de calor en México. En el caso de los puntos de calor detectados con imágenes diurnas, se presenta una

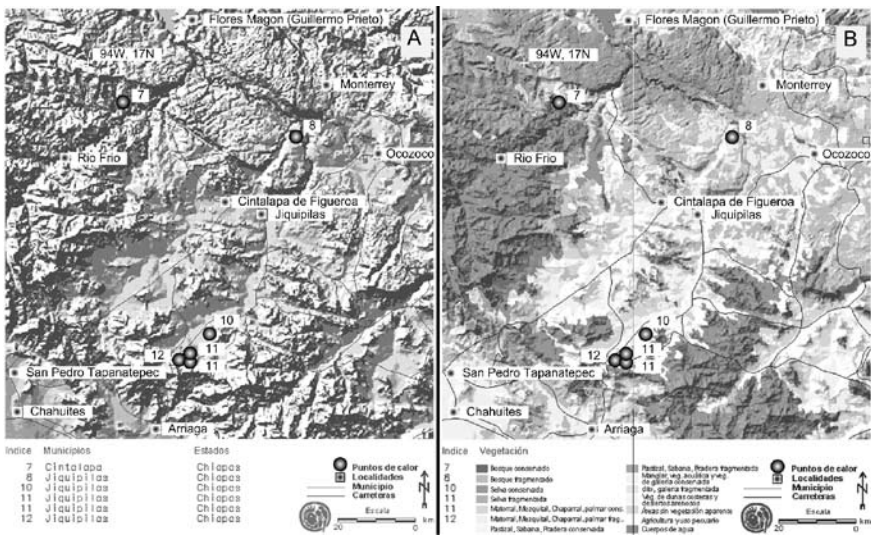
vista rápida de un mapa con el índice de vegetación mejorado (EVI por sus siglas en inglés) y la distribución de los puntos de calor. En la Figura 4 se muestran algunos de los productos generados en forma automática.

Publicación de la información

La información generada a partir de los procesos anteriormente expuestos, es publicada inmediatamente en la página web de la CONABIO y enviada vía correo electrónico a personas interesadas o involucradas en la prevención y combate de incendios. Los principales usuarios de la información son la Comisión Nacional Forestal, (CONAFOR) la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca (SAGARPA), así como organizaciones no gubernamentales (ONG).

En la página web existen dos formas de publicación de la información: una estática y la segunda dinámica. La primera se encuentra organizada en forma tabular por año y por país, se proporcionan estadísticas y compuestos en formato *shapefile* de los puntos de calor, en forma anual, mensual, diaria y por cada imagen MODIS.

FIGURA 4. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE CALOR SOBRE UN MODELO DIGITAL DEL TERRENO (A) Y SOBRE VEGETACIÓN (B).



Por cada paso procesado se presenta una tabla que muestra la información de los puntos de calor detectados, con los rubros mencionados en la sección “caracterización geográfica del sitio” y los productos auxiliares.

La segunda forma de publicación es mediante el uso de la tecnología de servicio de mapas para la web. Esta tecnología permite la consulta de los puntos de calor en forma espacial, utilizando cartografía de referencia como: estados, municipios, cabeceras municipales, vegetación potencial, mosaico de imágenes MODIS libre de nubes (del año 2003) para México y carreteras, entre otras. Esta tecnología permite realizar consultas sobre la ubicación e información de los puntos de calor conforme a las áreas de interés del usuario y permite generar mapas conforme a sus necesidades.

Con la finalidad de proporcionar la información en un formato de fácil acceso, los datos presentados en la tabla por cada imagen son enviados en forma automática vía correo electrónico en formato ASCII, a las personas o instituciones que así los requieran.

A partir de noviembre de 2009 se implementó un nuevo portal con el objetivo de mejorar el acceso a la información. Pensando en dos tipos principales de usuarios, el primero para aquellas personas involucradas en la prevención y combate de incendios forestales, que requieren información actualizada y oportuna, el segundo para aquellas personas dedicadas a la investigación que requieren información histórica.

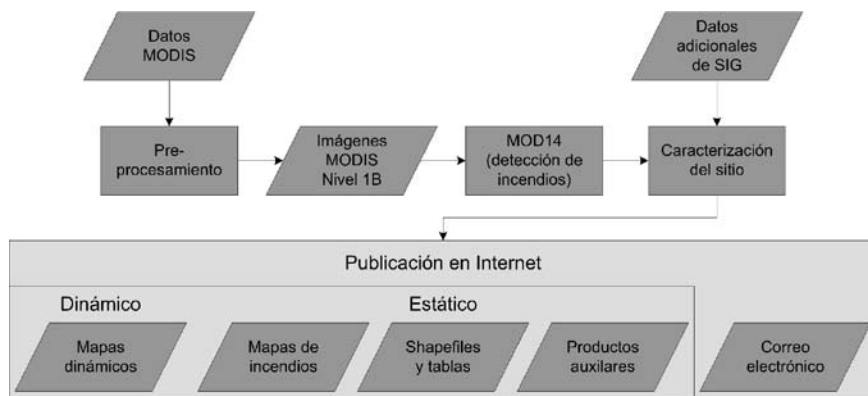
El nuevo portal integra toda la información de los puntos de calor detectados en una sola base de datos. Desde el año 2000 para México y sur de los Estados Unidos, y desde 2004 para Centroamérica. Dejando atrás la presentación en forma de calendario, esto permite realizar búsquedas rápidas de información en forma temporal y espacial, conforme a las necesidades y requerimientos de los usuarios.

El proceso desde la recepción de las imágenes hasta la publicación de los resultados se muestra en la figura 5.

Índice de propagación de incendios

El grado de humedad de la vegetación combinado con las condiciones meteorológicas es crucial para la propagación de incendios. Para el seguimiento de las condiciones de humedad de la vegetación en grandes áreas son utilizados diferentes índices de vegetación derivados de imágenes de satélite; el más común es el NDVI, que considera las condiciones de verdor, densidad, humedad y actividad de la ve-

FIGURA 5. PROCESO PARA LA DETECCIÓN DE PUNTOS DE CALOR



getación. El resultado del índice es un valor entre -1 y 1; cuanto más cercano al 1, la vegetación es más verde, densa y húmeda y viceversa.

Como parte del programa se determina un índice de propagación de incendios, con base exclusivamente en las condiciones de la vegetación, una vez detectado un punto de calor, cuál sería la vegetación con posibilidad de ser afectada. Para ello se compara el valor del NDVI que se deriva de las imágenes MODIS diarias actuales con el promedio del NDVI de tres años anteriores, que se obtiene del análisis de una serie de tiempo. El análisis muestra el comportamiento de la vegetación a lo largo del tiempo. La comparación proporciona en forma de indicador si la condición actual de la vegetación está por encima, igual o por debajo de la media de los años anteriores.

Para calcular el índice de propagación del año 2008 se realiza el análisis de series de tiempo del NDVI de los años 2005, 2006 y 2007; para ello se aplica el método de análisis armónico de series de tiempo propuesto por Roerink *et al.* (2000) (HANTS, por sus siglas en inglés, ver capítulo III). El objetivo de este método es eliminar valores irregulares que son causados por la presencia de nubes, ruido o falta de datos en las imágenes de satélite; los valores son sustituidos por valores interpolados, de esta manera se obtienen series de tiempo con una modificación, pero sin ruido o valores irregulares. Al analizar los tres años se obtiene el comportamiento fenológico de la vegetación (De Badts *et al.*, 2005). En el caso de México se identifican tres tipos de comportamiento principales: 1) Comportamiento no modal: asociado a vegetación que mantiene constante su estado fenológico, como la selva perennifolia, 2) Comportamiento uni-modal asociado a la vegetación con

un ciclo de crecimiento anual, como cultivos anuales o vegetación caducifolia y 3) Comportamiento bi-modal asociado a la vegetación con dos ciclos de crecimiento anual, como áreas agrícolas de riego.

A partir de la información antes mencionada se calcula el valor del NDVI del siguiente año y se genera una imagen teórica para cualquier fecha del mismo. Con la imagen teórica del NDVI y el valor real de la fecha actual se calcula una diferencia normalizada. Este índice se divide en categorías, a mayor diferencia negativa se considera que existe una anomalía negativa del NDVI, por lo tanto las condiciones de la vegetación se encuentran en posible estrés hídrico, indicando una mayor posibilidad de propagarse un incendio. Una anomalía positiva del NDVI indicaría mayor actividad en la vegetación que el esperado, por lo tanto mayor humedad en la vegetación, por lo que puede asumirse una menor posibilidad de propagación de un incendio.

Identificación de áreas quemadas

Como parte de un sistema integral, se amplía al programa de monitoreo de incendios existente de la CONABIO el componente para identificar y cuantificar las áreas quemadas y así evaluar el impacto de los incendios sobre la naturaleza.

El producto actual para la identificación de áreas quemadas utiliza datos de reflectancia de la superficie proveniente del sensor MODIS –Terra y Aqua con una resolución espacial de 250 m (MOD09). Como primer paso se generan compuestos de datos de 8 días, utilizando la información sobre la calidad de datos, la cual provee el producto MOD09 (QA-SDS). Solamente pixeles cumpliendo especificaciones estrictas, como el ángulo cenital del sensor menor a 45°, observaciones libres de nubes y sin efectos atmosféricos se preservan para generar los compuestos. Los pixeles que no cumplen con estas condiciones son eliminados. Con base en éste producto se generan los compuestos de 8 días, utilizando el valor mínimo de reflectancia de la superficie registrada en las bandas 1, 2 y 7; como sugieren varios estudios de Barbosa *et al.* (1998), Carmona-Moreno *et al.* (2005) y Chuvieco *et al.* (2005).

Dos índices espectrales se utilizan para la detección de las áreas quemadas, el NDVI, (Ecuación 1), que indica vegetación con actividad fotosintética. Este índice fue utilizado para la cartografía de áreas quemadas en bosques boreales (Kasischke y French, 1995). Sin embargo estudios en otros ecosistemas, utilizando imágenes de satélite registradas después del incendio, han demostrado que el uso exclusivo

del NDVI genera problemas de sobreestimación y subestimación de áreas quemadas (Trigg y Flasse, 2001). Por ello se aplica también un segundo índice, el "Normalized Burn Ratio" (NBR, ecuación 2), utilizando la banda infrarroja de onda corta (SWIR). Los valores bajos del índice indican áreas quemadas (Key y Benson 2005, van Wagtenonk *et al.*, 2004, Walz *et al.*, 2007) tomando en cuenta que en términos generales los valores de SWIR se incrementan después de un evento de incendio y los valores de la banda NIR disminuyen.

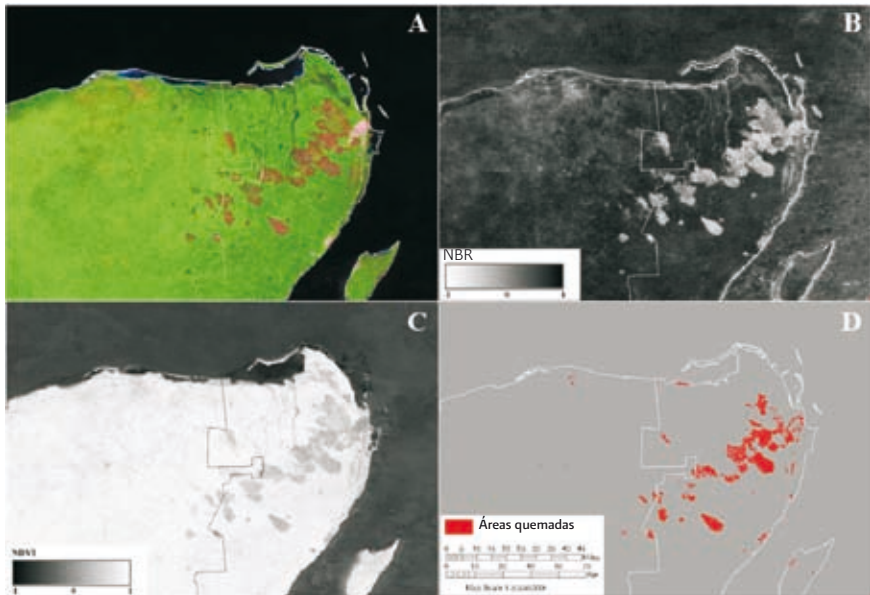
$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (2)$$

Un pixel está definido como área quemada si cumple con dos condiciones: el valor del NDVI está en el rango de 0.15 a 0.38 y el valor del NBR en el rango de -0.05 a -0.3; estos valores se definieron en forma empírica para el presente ejercicio. El método propuesto se enfoca en identificar áreas quemadas iguales o mayores a 5 pixeles. La ventaja de este método es la identificación rápida de áreas quemadas una vez que se completa el proceso de la generación de los compuestos. Existe una limitante al utilizar los mismos umbrales o rangos fijos para todo el país, debido a las diferencias ambientales, por tal motivo actualmente se busca establecer umbrales adaptables a las diferentes regiones del país y épocas del año.

La Figura 6 ilustra un ejemplo de áreas quemadas en mayo del año 2006 en la Península de Yucatán, así como los productos para derivar la información sobre la extensión y ubicación de las áreas quemadas. Claramente se puede ver en el compuesto de 8 días (del 25 de mayo al 1 de junio, Figura 6A) las áreas quemadas, las cuales destacan en la imagen. En el producto del NBR (Figura 6B) las zonas quemadas se observan en tonos claros, debido a la alta reflectancia en el canal SWIR en comparación con las áreas con vegetación alrededor. En contraste, las mismas zonas en la imagen del NDVI (Figura 6C) se observan en tonos oscuros (NDVI bajo) y la vegetación circundante en tonos claros (NDVI alto). Aplicando los dos índices se deriva una máscara binaria que muestra únicamente las áreas quemadas (figura 6D).

FIGURA 6. ÁREAS QUEMADAS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN A COMPUESTO MODIS DE OCHO DÍAS (25 DE MAYO AL 1 DE JUNIO 2006), B ÍNDICE NBR, C NDVI, D MÁSCARA BINARIA DE LAS ÁREAS QUEMADAS.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cada imagen recibida en la estación de recepción de la CONABIO es procesada para detectar los puntos de calor. Actualmente el proceso se encuentra totalmente automatizado; el tiempo de procesamiento a partir de la recepción de la imagen hasta la publicación de la información en la página web y enviada vía correo electrónico es aproximadamente de 30 minutos. Desde 2004, por solicitud de la CONAFOR el programa está en operación todos los días del año.

En los últimos cuatro años, de 2004 a 2007, se han procesado 8,905 imágenes MODIS. En este período han sido detectados 196,572 puntos de calor en México, de los cuales el 9 % (17,880) corresponden a imágenes nocturnas y el 91% (178,692) a imágenes diurnas. La distribución de los puntos de calor conforme a la vegetación y uso del suelo se presenta de la siguiente forma: el 25.2 % (4,513) de los puntos de calor nocturnos fueron ubicados en áreas de agricultura y ganadería, mientras el 35.5% (6,335) fueron localizadas en vegetación prima-

ria. El 39.3 % restante se distribuye en vegetación con elementos secundarios con el mayor número, asentamientos humanos y otras categorías.

En el caso de los puntos de calor diurnos, el porcentaje de puntos ubicados en zonas agrícolas y pecuarias es del 32.9 % (58,881), y los puntos registrados en áreas de vegetación primaria fue del 20.1 % (36,301). El 47.0 % restante se distribuye en vegetación con elementos secundarios con el mayor número, asentamientos humanos y otras categorías. Estos resultados muestran que existe fuerte influencia del uso del fuego en las actividades agropecuarias durante el día, por lo tanto sea considerado que existe una mayor posibilidad que los puntos de calor detectados con las imágenes nocturnas correspondan a incendios forestales, principalmente en zonas con cobertura de vegetación natural. El porcentaje de la distribución entre las actividades agropecuarias y la vegetación primaria es inverso, con las imágenes diurnas se registra más puntos de calor en las áreas de actividad humana y con las imágenes nocturnas el porcentaje disminuye en dichas áreas y aumenta en la vegetación natural.

Del porcentaje de puntos de calor registrados en la vegetación primaria, el bosque y la selva son los ecosistemas que más puntos de calor registran a lo largo de los cuatro años observados, ocupan el primero y segundo lugar respectivamente, como se observa en las tablas 1 y 2. Sin embargo durante el día el porcentaje de puntos de calor en las selvas incrementa con respecto a la noche, en decremento

TABLA 1. PUNTOS DE CALOR NOCTURNOS EN VEGETACIÓN PRIMARIA

	2004		2005		2006		2007	
	Puntos de calor	%	Puntos de calor	%	Puntos de calor	%	Puntos de calor	%
Bosque	417	75.7	2,149	79.9	1,280	66.9	939	79.4
Selva	56	10.2	333	12.4	517	27.0	118	10.0
Matorral	14	2.5	62	2.3	49	2.6	30	2.5
Pastizal	33	6.0	89	3.3	39	2.0	34	2.9
Otros tipos de vegetación	31	5.6	55	2.0	28	1.5	62	5.2
Total	551	100	2,688	100	1,913	100	1,183	100

TABLA 2 PUNTOS DE CALOR DIURNOS EN VEGETACIÓN PRIMARIA

	2004		2005		2006		2007	
	Puntos de calor	%	Puntos de calor	%	Puntos de calor	%	Puntos de calor	%
Bosque	2,219	45.5	8,526	62.8	5,990	61.8	4,819	59.1
Selva	2,008	41.1	3,786	27.9	2,887	29.8	2,507	30.7
Matorral	237	4.9	508	3.7	409	4.2	278	3.4
Pastizal	208	4.3	513	3.8	275	2.8	336	4.1
Otros tipos de vegetación	208	4.3	239	1.8	132	1.4	216	2.6
Total	4,880	100	13,572	100	9,693	100	8,156	100

del porcentaje de los puntos ubicados en el bosque, con excepción del año 2006, en el cual el porcentaje de los puntos de calor reportados en las selvas durante la noche fue el más alto de los cuatro años. Este comportamiento indica una mayor presión por el fuego en los ecosistemas templados, pero con una fuerte influencia en los ecosistemas de selvas principalmente durante el día, especialmente en el año 2004.

Los matorrales y pastizales ocupan el tercer y cuarto lugar, muy por debajo del porcentaje registrado en los ecosistemas arbolados. La categoría “otros tipos de vegetación”, conformada por vegetación asociada a cuerpos de agua o de zonas muy áridas, presenta el porcentaje más bajo, indicando que las condiciones ambientales de humedad o escasa vegetación reducen la presencia del fuego, aunque no su total ausencia.

La cantidad de puntos de calor detectados está fuertemente relacionada con las condiciones meteorológicas prevalecientes en los años analizados. En las tablas antes citadas, se identifican dos años extremos: 2004 el cual reportó el menor número de puntos de calor y 2005 que reportó el mayor número, casi tres veces más que el 2004, esto obedece a las condiciones de humedad de ambos años. El año 2004 fue considerado como un año húmedo debido a que se registraron precipitaciones desde el mes de enero, siendo uno de los meses más húmedos en los últimos 10 años (SMN, 2008). De los cuatro años analizados el año 2004 reportó la mayor precipitación anual con 872.2 mm, mientras el año 2005 reportó la más baja con 788.1 mm, de los cuatro años fue el más seco. En comparación con los años 2006

y 2007 que reportan valores intermedios, entre los dos extremos mencionados, tanto para los puntos de calor como la precipitación anual con 808.0 mm y 812.3 mm respectivamente. Estos datos son el promedio nacional, pero reflejan la relación directa entre los puntos de calor y la precipitación. Sin embargo es preciso que se tome en cuenta las condiciones regionales que pudieron prevalecer, como el ejemplo que a continuación se menciona.

El paso del huracán Wilma en la península de Yucatán, en septiembre de 2005, influyó en el incremento de puntos de calor detectados en el ecosistema de selva en el año 2006, al dejar suficiente vegetación muerta disponible como combustible, principalmente en los estados de Quintana Roo y Yucatán. Uno de los sitios más afectados es presentado más adelante como ejemplo en la identificación de áreas quemadas en la Figura 6.

COMPARACIÓN DE PUNTOS DE CALOR Y VALIDACIÓN DE LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREA QUEMADA

La validación de los productos generados con imágenes de satélite de resolución media como son las imágenes MODIS es difícil, porque generalmente no existen suficientes datos de campo comparables (Giglio *et al.*, 1999). Por lo tanto la comparación de productos con similar resolución (Boschetti *et al.*, 2004) o con datos de alta resolución espacial (Barbosa *et al.*, 1999, Ressler *et al.*, 2009, Roy *et al.*, 2005, Walz *et al.*, 2007, Morissette *et al.*, 2005, Csiszar *et al.*, 2006) son las opciones más comunes para la validación. En particular el análisis de validación con datos de alta resolución espacial tiene que considerar las diferencias en la escala.

Con el objetivo de verificar la información generada por el programa de puntos de calor fue realizada una comparación de los puntos de calor detectados por la estación de recepción de la CONABIO y los puntos detectados por el *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS) de la Universidad de Maryland (Justice *et al.*, 2002). El análisis se realizó comparando los puntos detectados en cada paso; la tabla 3 (página siguiente) muestra las estadísticas de los años 2004 a 2007 (Ressler *et al.*, 2009).

El número de puntos de calor detectados por la CONABIO representa aproximadamente el 85 % de todos los puntos registrados por FIRMS, el análisis permitió también conocer que existen puntos de calor que no fueron detectados por FIRMS, pero sí por la CONABIO. El porcentaje de concordancia de los puntos de FIRMS en relación a la CONABIO es del 78 %, en el caso contrario, los puntos de la CONABIO en

TABLA 3. COMPARACIÓN DE LOS PUNTOS DE CALOR DETECTADOS POR LA CONABIO Y FIRMS

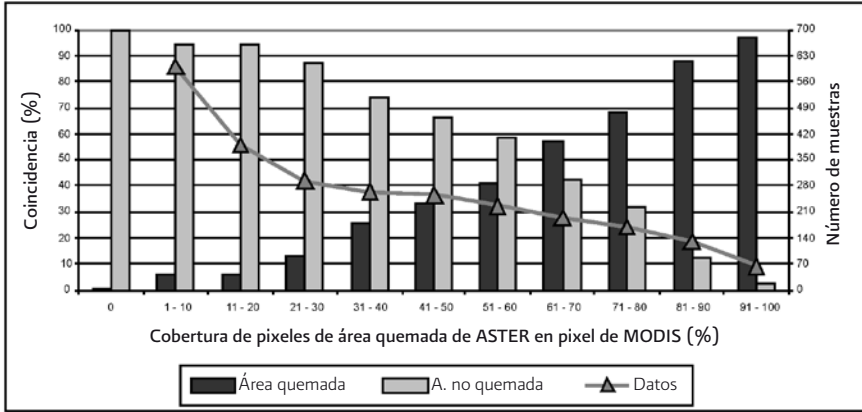
Año	Número de puntos de calor			Proporción de puntos de calor [%]		
	Conabio	FIRMS	Concordancia	Conabio vs. FIRMS %	Concordancia a CONABIO %	Concordancia a FIRMS %
2004	32,335	39,424	27,723	82.02	85.74	70.32
2005	71,636	81,447	64,487	87.95	90.02	79.18
2006	48,272	55,668	46,752	86.71	96.85	83.98
2007	44,329	55,965	43,185	79.21	97.42	77.16
Total	196,572	232,504	182,147	84.55	92.66	78.34

relación a FIRMS es del 92%. Este porcentaje se incrementa en los años de 2006 y 2007 debido a que el sistema operacional es más estable, al contar con mayor número de pasos en total y mayor número de pasos completos.

Algunas de las razones de las discrepancias entre los puntos de calor detectados por FIRMS y la CONABIO, son agrupadas en dos rubros: 1) Problemas técnicos en la estación de recepción de la CONABIO, lo que ocasionó la pérdida de pasos completos o datos en algunos pasos, a diferencia de la disponibilidad de los datos que tiene FIRMS, al contar con una cobertura completa a partir de la red global de adquisiciones de los datos. 2) Existen diferencias mínimas en la aplicación del algoritmo por parte de la CONABIO, además en el año de 2006 el software utilizado para el pre-procesamiento de las imágenes fue sustituido, mejorando la geolocalización y la calibración de los datos y por lo tanto los resultados.

El algoritmo aplicado para la identificación de áreas quemadas, que se refirió con anterioridad en la sección de métodos, resulta en estimaciones conservadoras, debido a que el análisis visual de la imagen ASTER mostró una subestimación del algoritmo. De igual forma en el ejercicio de la identificación de áreas quemadas originadas por los incendios ocurridos al Sur de California en otoño de 2007, aplicando un algoritmo similar con datos MODIS de 500m de resolución espacial (Ressl *et al.*, 2009) demostró una subestimación. Fueron utilizados datos de ASTER con 15m de resolución espacial para validar los resultados obtenidos. La diferencia de escala fue considerada al calcular el porcentaje del pixel MODIS identificado como área quemada usando la imagen ASTER. Para un porcentaje del 50% del pixel MODIS la coincidencia de áreas quemadas identificadas con ambas imágenes fue del 40%, sin embargo incrementó a más del 85% de coincidencia cuando el porcentaje del pixel MODIS fue mayor al 80%. Los resultados se aprecian en la Figura 7.

FIGURA 7. COINCIDENCIA DE ÁREAS QUEMADAS MODIS-ASTER



Uso de la información

Desde el año 1999 la CONABIO proporcionó información sobre los puntos de calor al Centro Nacional de Combate de Incendios Forestales, de la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, (SEMARNAP) hoy SEMARNAT. En el año 2003 la CONAFOR constituyó el grupo interinstitucional de prevención y combate de incendios forestales, con la colaboración de diferentes instituciones, una de ellas es la CONABIO.

Dentro de este grupo la CONABIO tiene el compromiso de publicar y proporcionar diariamente la información generada a partir del uso de las imágenes de satélite. Esta información es utilizada por la Gerencia de Protección contra Incendios Forestales de la CONAFOR para elaborar diariamente el documento de alerta temprana de incendios forestales, debido a que se cuenta con la información en casi tiempo real, junto con información proveniente de otras instituciones, como datos sobre las condiciones meteorológicas del país, por parte del Servicio Meteorológico Nacional. El informe es enviado a todas las instancias involucradas en la prevención y combate de incendios.

Actualmente la CONABIO tiene registrados 590 usuarios de 109 instancias diferentes que reciben la información vía correo electrónico. Los principales usuarios de la información son CONAFOR, Comisión de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Por otra parte la disponibilidad de los puntos de calor ha permitido el desarrollo de modelos de peligro de incendios a escala regional, como es el caso del documento México, incendios forestales en Chihuahua, presentado por la empresa Estrucplan de Argentina (2008) y la cartografía de riesgo de incendios forestales de una región de Durango, elaborado por Cortés (2008).

El uso de la información proporcionada es básicamente para la confirmación y detección de incendios forestales, principalmente en aquellos estados de la república mexicana con gran extensión territorial, el predominio de territorio montañoso y áreas de difícil acceso. Como ejemplo se citan los estados de Oaxaca, Chiapas, Sinaloa, Tabasco, San Luis Potosí, entre otros. En el Centro Nacional de Control de Incendios Forestales de la CONAFOR utiliza la información para la elaboración del reporte diario de alerta temprana para incendios forestales, junto con información disponible de otras instituciones, este reporte es redistribuido a las instituciones involucradas en la prevención y combate de incendios. En caso de las áreas naturales protegidas (ANP) se proporciona si esta cerca o dentro de una ANP, específico, información útil para valorar el peligro de incendios en dichas áreas. En caso de las ANP del estado de Chiapas se identifica si están dentro de las zonas núcleo o zona de amortiguamiento.

Por otra parte la SAGARPA está interesada en monitorear el uso del fuego en las áreas agrícolas, para llevar un mejor control del manejo del fuego y tratar de evitar incendios forestales.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El uso de las imágenes de satélite MODIS en la detección de incendios para México y Centro América ha generado información de utilidad para su prevención y combate, incrementando el número de observaciones a lo largo del día, así como la introducción de productos auxiliares que proporcionan información para la detección oportuna. Esto queda demostrado con el número creciente de usuarios que reciben la información vía correo electrónico.

La información generada presenta ventajas y desventajas, entre las primeras se puede citar la disponibilidad de información oportuna sobre la ubicación de un incendio en zonas de difícil acceso, esta situación es frecuente en aquellos estados cuyo territorio es amplio y montañoso, como es el caso de Oaxaca y Guerrero, así como en zonas de pantanos como el caso en Tabasco y Campeche.

Dentro de las desventajas se encuentra la incertidumbre de que un punto de calor corresponda efectivamente a un incendio forestal. Además por el diseño del sensor

y las características geográficas de México y Centro América existen algunas limitaciones, es posible que los incendios no sean detectados, al no contar con datos disponibles o por la presencia de nubes como se aprecia en la Figura 1. Por otra parte es importante mencionar que el incendio puede ocurrir durante el tiempo en cual no pasa el satélite, no se tiene cobertura en el área que ocurre el incendio o que los incendios sean de baja temperatura o de extensión pequeña para poderlos detectar. Por lo tanto no todos los puntos de calor detectados son incendios (tan sólo el 32% de los puntos de calor son detectados en áreas agropecuarias que pueden corresponder a quemas agrícolas) y no todos los incendios son detectados.

Por todo lo anterior, continuar mejorando el programa de puntos de calor, como se ha venido realizando año con año y convertirlo a un sistema de alerta temprana, monitoreo y evaluación, hace que la información sea de utilidad en las diferentes etapas en el manejo del fuego, así como en diferentes ámbitos de investigación para su estudio y correcta evaluación.

Entre las perspectivas futuras del sistema se considera desarrollar los siguientes productos: 1) introducir en la etapa de monitoreo el mapeo móvil en el campo en casi tiempo real, después de la detección del incendio y utilizando dispositivos portátiles de mapeo con información cartográfica auxiliar. 2) Mejorar el acceso a la información de los puntos de calor, para agilizar la búsqueda y obtención de información conforme a las necesidades del usuario, mediante un nuevo portal de la página web, 3) Mejorar el índice de propagación utilizando un modelo de estimación de la humedad del combustible a partir de datos satelitales y 4) implementar en forma operativa la identificación de áreas quemadas.

Finalmente, es necesario preparar el sistema para la nueva generación de imágenes del sistema NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) con imágenes VIIRS (Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite) que sustituirán a las imágenes utilizadas para la detección de puntos de calor a partir del año 2010. Para ello, la CONABIO forma parte de un grupo de instituciones coordinadas por el *Direct Readout Lab* de la NASA que se encuentran probando una versión prototipo para procesar datos VIIRS denominada IPOPP (Integrated Polar Orbiting Processing Package), por lo que la transición entre el procesamiento con datos MODIS a VIIRS será transparente para el usuario, ya que se seguirán entregando los mismos productos descritos anteriormente.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de los investigadores de la Universidad de Maryland quienes proporcionaron los datos de FIRMS, para desarrollar la comparación de los puntos de calor.

REFERENCIAS

- Barbosa P.M., Pereira J.M.C. and Gregoire, J.-M., 1998. Compositing criteria for burned area assessment using multitemporal low resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 65: 38-49.
- Barbosa P.M., Gregoire J.-M. and Pereira, J.M.C., 1999. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale, *Remote Sensing of Environment*, 69: 253-263.
- Boschetti, L., Eva, H.D., Brivio, P.A. and Grégoire, J.-M., 2004. Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products, *Geophysical Research Letters*, 31: L21501 DOI: 10.1029/2004GL021229.
- Carmona-Moreno, C., Belward, A., Malingreau, J.-P., Hartley, A., Garcia-Alegre, A.L., Antonovskiy, M., Buchshtaber, V. and Pivovarov, V., 2005. Characterizing inter-annual variations in global fire calendar using data from Earth observing satellites *Global Change Biology*, 11(9): 1537-1555.
- CFS, 2008. Forest fire in Canada. Online Portal URL: <http://fire.cfs.nrcan.gc.ca>. Natural Resources Canada (fecha de la última consulta: 29 de Mayo de 2008).
- Chuvieco, E., Centura, G., Martin, M.P. and Gomez, I., 2005. Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for Burneo land mapping, *Remote Sensing of Environment*, 94: 450-462.
- CONABIO, 1998a. Los incendios en México: un diagnóstico de su efecto en la diversidad biológica. Online Portal URL http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/incendios.html. Conabio (última consulta: 20 de abril de 2009).
- , 1998b. Los incendios en México: un diagnóstico de su efecto en la diversidad biológica. Informe entregado a la SEMARNAT. Sin publicar.
- CONAFOR, 2006. *Los incendios forestales en México 2005*. Comisión Nacional Forestal, Jalisco México, 150 p.
- , 2008. *Descripción del fenómeno*. Documento interno de la Comisión Nacional Forestal.

- Cortés, A., 2008. Cartografía de riesgo de incendios en una región de Durango, México. Tesis de doctorado. Universidad de Alcalá de Henares, España.
- Csiszar, I., Morisette, J. and Giglio, L. 2006. Validation of active fire detection from moderate resolution satellite sensors: the MODIS example in Northern Eurasia, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1757-1764.
- de Badts, E., G. López, B. Wickel, I. Cruz y R. Jiménez, 2005. A fire risk propagation map based on NDVI anomalies, *Proceedings of the 5th Internacional Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment*, Universidad de Zaragoza, (de la Riva, J., Pérez-Cabello, F., and Chuvieco, E., (Eds)) pp. 113-118.
- Estrucplan, 2008 México – Incendios Forestales en Chichuahua, parte 1 y 2. Portal URL <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=1434>. Estrucplan on line, (fecha de la última consulta 19 de abril de 2009).
- Flasse, P. and Ceccato, P., 1996. A contextual algorithm for AVHRR fire detection. *International Journal Remote Sensing*. 17(2): 419 - 424
- Galindo, I., 2002. Presentación: Real-time applications of AVHRR data to natural and anthropogenic disasters en Satellite Direct Readout Conference for the Americas. Diciembre 2002, Miami, Estados Unidos.
- Giglio, L., Kendall, J.D., y Justice, C.O. 1999. Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data, *International Journal of Remote Sensing*, 20: 1947-1985.
- Giglio, L., Desclotres, J., Justice, C. y Kaufman, Y., 2003. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 87: 273-282.
- González, L., 2008. *Análisis del efecto de El Niño sobre los mega-incendios en México*. Tesis de Maestría en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. México D.F.
- INPE, 2008. Queimadas–Monitoramento de Focos, Online Portal URL: <http://www.cptec.inpe.br/queimadas/indexold.shtml> (última consulta: 29 de mayo de 2008).
- Justice, C. O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J., Roy, D., Desclotres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F. y Kaufman, Y., 2002. The MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, 83: 244-262.
- Justice, C.; Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.; Csiszar, I.; Morisette, J.; Kaufman, Y. 2006: *Algorithm Technical Background Document MODIS FIRE PRODUCTS*. (MODIS Science Team) Version 2.3, 1 October 2006.
- Kasischke, E. S., y French, N. H. F., 1995. Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forests using multiple-season AVHRR NDVI composite data, *Remote Sensing of Environment*, 51: 263-275.

- Key, C., and Benson, N. C., 2005. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity, Report, URL: <http://nrmsc.usgs.gov/research/ndbr.htm>, U. S. Geological Survey, Boulder, Colorado (fecha de la última consulta: 20. Mayo de 2006).
- Landgate, 2008. Status authority of Western Australia. Online Portal URL: <http://www.landgate.wa.gov.au/corporate.nsf>. (fecha de la última consulta: 29. Mayo de 2008).
- Li, Z., Nadon, S., Chilar, J. 2000. Satellite-based detection of Canadian boreal forest fires, development and application of the algorithm, *International Journal of Remote Sensing*, 21: 3057-3069.
- Magaña, V., 1999. *Los impactos de El Niño en México*. Universidad Nacional Autónoma de México-Secretaría de Gobernación.
- Manzo, L.; Aguirre, R.; Álvarez, R., 2004, Multitemporal analysis of land surface temperature using NOAA- AVHRR: preliminary relationships between climatic anomalies and forest fire, *International Journal Remote Sensing*. 25(20): 4417– 4423.
- Morissette, J.T., Giglio, L., Csiszar, I. and Justice, C.O. 2005. Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data, *International Journal of Remote Sensing*, 26: 4239-4264.
- NASA/University of Maryland, 2002. MODIS Hotspot / Active Fire Detections. Data set. MODIS Rapid Response Project, NASA/GSFC [producer], University of Maryland, Fire Information for Resource Management System [distributors]. URL <http://maps.geog.umd.edu>
- Ortiz, I.; Vidal, R.; Gómez, G.; Álvarez, R., 2003. Evaluación de las plumas de humo de los incendios forestales de 1998 en México y la utilidad de las imágenes NOAA-AVHRR, *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. 23:103-114.
- Palacio, J.L.; Luna, L.; Macías, L., 1999. Detección de incendios en México utilizando imágenes AVHRR (temporada 1998), *Investigaciones Geográficas boletín del Instituto de Geografía*. 28:7 – 14.
- Ressler, R., López, G., Cruz, I., Colditz, R.R., Schmidt, M., Ressler, S., Jiménez, R., 2009. Operational active fire mapping and burnt area identification applicable to Mexican Nature Protection Areas using MODIS and NOAA-AVHRR direct readout data, *Remote Sensing of Environment*. 113:1113-1126.
- Rodríguez, D., 2006. Ecología del fuego y manejo integral del fuego en las montañas del Valle de México (bosque de coníferas), *Incendios Forestales, definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. Edit. Grupo Mundi Prensa, CONAFOR, México D.F.

- Roerink, G.J., Menenti, M. and Verhoef, W., 2000. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series, *International Journal of Remote Sensing*, 21(9): 1911-1917.
- Roy, D.P., Jin, Y., Lewis, P.E., and Justice, C.O., 2005. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data, *Remote Sensing of Environment*, 97: 137-162.
- Servicio Meteorológico Nacional, 2009. Monitoreo atmosférico Ambiental – Detección y seguimiento de incendios forestales, URL <http://smn.cna.gob.mx/>, Servicio Meteorológico Nacional (fecha de última consulta mayo 2009)
- SMN Servicio Meteorológico Nacional, 2008. Monitoreo de sequía de América del Norte – Información histórica, URL <http://smn.cna.gob.mx/>, Servicio Meteorológico Nacional (fecha de última consulta junio 2008)
- Trigg, S. y Flasse, S., 2001. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah, *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2641-2647.
- van Wageningen, J., Root, W.R.R. y Key, C.H., 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity, *Remote Sensing of Environment*, 83: 97-111.
- Walz, Y., Maier, S.W., Dech, S.W., Conrad, C. y Colditz, R. R., 2007. Classification of burn severity using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): A case study in the jarrah-marri forest of southwest Western Australia, *Journal of Geophysical Research*, 112, G02002, doi:10.1029/2005JG000118.

CARTOGRAFÍA UTILIZADA EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, (CONANP) 2008. *Áreas Naturales Protegidas Federales*. México. Morelia, Michoacán, México.
- Instituto Nacional de Geografía, estadística e Informática (INEGI), 2006. *División Municipal de México, 2005*. Obtenido del marco Geoestadístico Municipal, II Censo de Población y Vivienda 2005. Versión 1.0. Escala 1:250000. México.
- Dirección General de Geografía - Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 2005. *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación escala 1:250000, serie III*. INEGI.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1997). *Modelo Digital del Terreno*. Escala 1:250000. México.

CAPÍTULO 7

Programa de mapeo para fuegos activos MODIS

Everett Hinkley, Brad Quayle, Brian Schwind

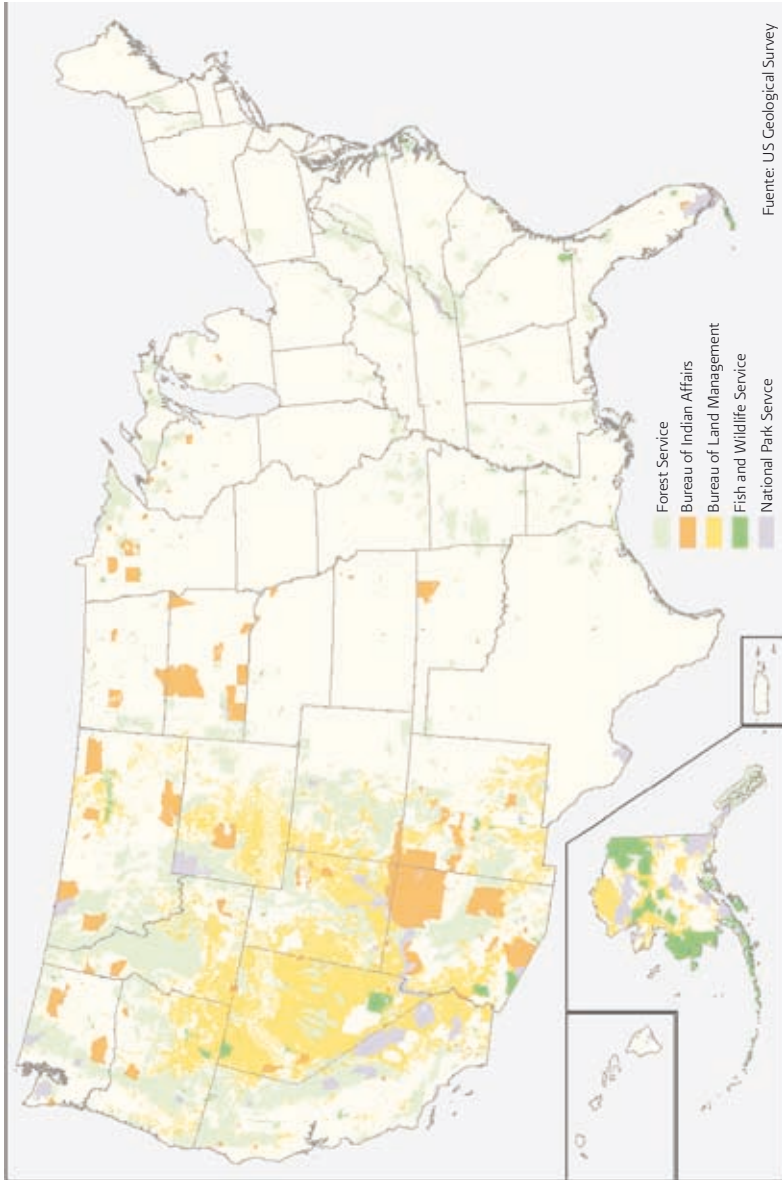
Con el objeto de atender la necesidad de información frecuente sobre los incendios forestales para apoyar su evaluación y manejo en extensas áreas geográficas, el Servicio Forestal de la USDA implementó el uso de sensores satelitales de alta resolución temporal y visión sinóptica. En el año 2000, el Centro de Aplicaciones de Percepción Remota (RSAC), del Servicio Forestal USDA, comenzó a investigar la utilidad de las imágenes y productos derivados provistos por el Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) para la detección y el monitoreo diario de incendios. Desde entonces el esfuerzo se ha convertido en el Programa de Mapeo de Fuegos Activos MODIS del Servicio Forestal USDA, que respalda el Servicio Forestal y el manejo interinstitucional de los incendios silvestres en los niveles regional y nacional. Este capítulo describe las características pertinentes del sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA, con respecto a su utilidad para la detección y mapeo cotidianos de incendios forestales. Además, se discute el enfoque operacional sistemático desarrollado a través de la coordinación entre la NASA, el equipo de productos para anomalías de fuego y termales MODIS y RSAC para procesar datos de imágenes termales y reflectivas para proveer a tiempo productos geoespaciales relacionados con el fuego. Este enfoque colaborativo sirve como modelo operacional para instrumentos de satélites futuros capaces de detectar y caracterizar el fuego.

INTRODUCCIÓN

El Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) maneja cerca de 81 millones de hectáreas de tierras públicas distribuidas a través de los Estados Unidos. Las tierras del Servicio Forestal están estrechamente asociadas geográficamente con más de 182 millones de hectáreas de tierras públicas adicionales administradas por las agencias de manejo de tierras del Departamento del Interior (DOI) incluyendo el Departamento de Manejo de Tierras, el Servicio de Parques Nacionales, el Departamento de Asuntos Indígenas, y el Servicio de Pesca y Vida Salvaje (Figura 1). Aunque el Servicio Forestal y las agencias DOI tienen la responsabilidad por la respuesta inicial, el control y la supresión de igniciones de incendio forestal en sus respectivas áreas de manejo, los recursos para la supresión del fuego se comparten entre estas agencias para controlar y suprimir cualquier incendio forestal que evoluciona para convertirse en un incidente mayor. El Centro Nacional de Coordinación interinstitucional (NICC) en el Centro Nacional interinstitucional de Fuego (NIFC) en Boise, Idaho facilita estos esfuerzos de coordinación interinstitucional de incendios forestales en los niveles regional y nacional.

Los Estados Unidos tienen un amplio rango de sistemas de fuego con estructura y composición variables de combustible, sujetos a una variedad de factores medioambientales locales y regionales que pueden afectar el potencial del fuego. La distribución de las condiciones de quema y la severidad de los incendios forestales varía espacial y temporalmente entre las temporadas de incendios así como dentro de la misma estación de fuego. Los períodos extensos de actividad de incendios forestales extremos sobre amplias áreas geográficas, tal como la reciente temporada de incendios forestales en el oeste de los Estados Unidos del 2000 y 2002, han ilustrado la necesidad de parte de los manejadores de incendios forestales de datos e información geoespacial oportuna que describa la actividad de los incendios forestales a escalas nacional y regional. Adicionalmente, el suministro de estos datos e información son también importantes en el contexto de eventos regionales de alta intensidad con evolución rápida, tales como los recientes incendios del oeste de Montana en agosto del 2003, los incendios de Alaska en el verano del 2004, y los incendios del sur de California en octubre del 2007. El Servicio Forestal ha asumido un rol activo en la implementación de tecnologías de percepción remota con sensores de visión sinóptica y alta temporalidad para la detección y el monitoreo cotidiano de incendios forestales. Los datos y la información recogi-

FIGURA 1. TIERRAS PÚBLICAS EN LOS ESTADOS UNIDOS MANEJADAS POR EL SERVICIO FORESTAL USDA Y LAS AGENCIAS DE MANEJO DE TIERRAS DEL DEPARTAMENTO DEL INTERIOR.



dos con estas tecnologías y aplicaciones asociadas proveen información crítica para la evaluación y el manejo de los incendios forestales dentro del Servicio Forestal y otras agencias de manejo de tierras.

SENSORES SATELITALES DE VISTA SINÓPTICA Y DE ALTA TEMPORALIDAD PARA EL MANEJO DE FUEGOS DEL SERVICIO FORESTAL

Al principio de la década de 1990 el Servicio Forestal empezó a utilizar sensores de resolución de alta temporalidad a bordo de satélites para atender la necesidad de datos geospaciales a tiempo e información en relación a la detección y monitoreo de la actividad de los incendios forestales. A lo largo de la temporada de incendios en 1994, la Región Intermontanas del Servicio Forestal implementó el uso del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) con capacidades de acceso a datos en tiempo real para la detección y monitoreo de fuegos en el oeste de los Estados Unidos. Aunque está todavía utilizado actualmente por el Servicio Forestal y otras agencias de detección y mapeo de fuegos, el sensor de resolución de un kilómetro del AVHRR a bordo de los satélites ambientales operacionales polares (POES) de la NOAA, fue diseñado principalmente para observaciones meteorológicas y no tiene una configuración óptima para las características espectrales de la detección de fuegos. Además pueden ocurrir errores posicionales significantes con la georeferencia sistemática de los productos de imagen AVHRR (USGS, 2004). En consecuencia, a fines del año 2000, el Centro de Aplicaciones de Monitoreo Remoto del Servicio Forestal (RSAC) empezó a investigar la utilidad de MODIS para la detección y el monitoreo activo de fuegos con operatividad mejorada a escalas regional y nacional.

El Espectrorradiómetro de Imagen de Resolución Moderada

MODIS es uno de los juegos de sensores que fue lanzado desde la plataforma Terra en diciembre de 1999. Un segundo sensor MODIS está incluido también en la misión Aqua lanzada en mayo del 2002. Ambas plataformas Terra y Aqua forman parte de la constelación de órbita polar de los Satélites de Observación Terrestre (EOS) de la NASA (ver capítulo I). Diseñados específicamente para el monitoreo de los sistemas terrestres, oceánicos y atmosféricos de la tierra a largo plazo, cada sensor MODIS tiene una combinación única de características que son ventajosas para la detección y el monitoreo diario de fuegos en comparación con los sensores

existentes de resolución baja como AVHRR.

Estas características incluyen:

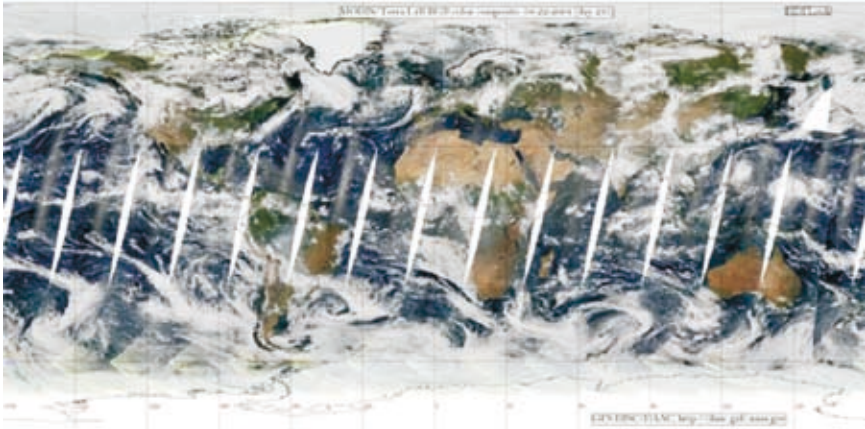
1. Resolución temporal. Ambos MODIS Terra y Aqua orbitan en una altura de aproximadamente 705 km con un ciclo repetitivo de órbita de 16 días. La plataforma Terra sigue una órbita polar descendente de sincronía solar con un paso sobre el ecuador a las 10:30 a.m., en tanto el MODIS Aqua sigue una órbita polar ascendente de sincronía solar con cruce sobre el ecuador a la 1:30 p.m..

El sensor MODIS tiene una vista angular de 55 grados a cada lado del nadir procurando una franja visible de 2330 km de la superficie terrestre centrada en el trazo de la órbita del instrumento. La franja ancha de visibilidad de MODIS en combinación con la configuración orbital de cada plataforma procura para cada sensor MODIS la habilidad de representar cualquier lugar desde medianas a altas latitudes de la tierra a diario (Figura 2). Además, ambos sensores tienen un ciclo funcional de 100% y por eso colectan datos de imagen de emisión térmica durante los pases nocturnos, sumándose a las adquisiciones de datos de imágenes tanto de reflexión solar como de emisión térmica durante los pases diurnos, brindando un total de cuatro observaciones térmicas diarias para la detección y monitoreo de fuegos. La frecuencia de los pases de los sensores MODIS Terra y Aqua permite también el monitoreo de cambios diarios en la actividad de fuegos. (Giglio et al., 2003, Justice et al., 2002). Específicamente, la frecuencia de los pases diurnos de Terra y Aqua coincide con los periodos de actividad de fuego relativamente más altos ocurriendo durante la tarde temprano y tarde.

2. Resolución espectral y espacial. MODIS tiene una resolución espectral relativamente alta coleccionando datos de imagen en 36 bandas espectrales corregistradas incluyendo 20 bandas solares reflectivas y 16 bandas de emisión térmica. La resolución espacial de estas bandas varía entre 250 metros y un kilómetro (ver capítulos I y II). Los anchos de banda espectral de MODIS están seleccionados específicamente para representar fenómenos terrestres, marinos y atmosféricos particulares. Además, se recolectan datos espectrales usando un rango dinámico de 12 bit procurando una sensibilidad incrementada hacia variaciones sutiles de respuestas espectrales de ciertas características.

Las bandas solares reflectivas de MODIS están ubicadas en porciones del vi-

FIGURA 2. COBERTURA GLOBAL DE MODIS TERRA EN AGOSTO 22 DE 2004. LA FRANJA DE 2300 KM FACILITA UNA COBERTURA COMPLETA DIARIA DEL GLOBO TERRESTRE EN LATITUDES MEDIANAS HASTA ALTAS. IMAGEN CORTESÍA DE NASA GODDARD DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER (DAAC) GLOBAL BROWSE IMAGE GALLERY ([HTTP://DAAC.GSFC.NASA.GOV/GALLERY/GLOBAL_BROWSE/](http://daac.gsfc.nasa.gov/gallery/global_browse/))



sible, del infrarrojo cercano y del infrarrojo mediano del espectro electromagnético (0.4 a 2.1 μm). Las primeras siete bandas reflectivas de MODIS son colectadas a una resolución espacial ya sea de 250 metros o de 500 metros y usadas principalmente para el monitoreo de las características de la superficie terrestre (17). Estas “bandas terrestres” facilitan el monitoreo diario de dispersión de humo y aerosol de incendios forestales, y la delimitación de la extensión de las áreas quemadas.

Las bandas de emisión termal incluyen las longitudes de onda desde medio-infrarrojo hasta infrarrojo de onda larga (3.6 a 14.4 μm) y son tomadas a una resolución espacial de un kilómetro. El algoritmo (Giglio et al., 2003, Justice et al., 2002; NASA, 2004) de detección de fuegos usa bandas de emisión termal para detectar y caracterizar fuegos activos sirviéndose de un acercamiento absoluto y contextual y está basado en la metodología Dossier/Matson (Matson y Dossier, 1981; NASA, 2004) que valora la diferencia en la radiación observada de un fuego de 4 μm (bandas MODIS 21/22) y de 11 μm (banda MODIS 31) (ver capítulo VI). Las bandas MODIS de 4 μm y de 11 μm tienen umbrales de saturación relativamente altos para minimizar la saturación potencial del instrumento y para habilitar la caracterización de las propiedades del fuego.

3. Precisión geoposicional. Los datos de imagen MODIS mantienen una precisión

geoposicional del orden de +/- 50-metros al nadir (Matson y Dossier, 1981; NASA 2004). La exactitud posicional a nivel subpixel de MODIS permite una localización relativamente precisa de los pixeles de 1 km de detección de fuego comparado con las detecciones de un kilómetro con AVHRR que pueden tener un error de posicionamiento de más de varios kilómetros (USGS, 2004). Además, la precisión geoposicional de MODIS facilita la integración consistente de imágenes reflectivas de 250 metros y de 500 metros y los datos de detección de fuego a un kilómetro con otras fuentes de datos geoespaciales de resolución y escala similar.

4. Transmisión directa/ Lectura de salida directa. Los datos adquiridos por MODIS se almacenan temporalmente a bordo del instrumento y son retransmitidos a una red de estaciones terrestres que enseguida manda los datos al Centro de Vuelo Espacial Goddard (GSFC) de la NASA para procesamiento, generación y distribución de productos.

Sin embargo, cada sensor MODIS también transmite datos adquiridos en tiempo real tanto en pases diurnos como nocturnos para la recepción por estaciones de lectura directa en la tierra con un receptor de banda X. Las estaciones de lectura directa siguen al sensor MODIS mientras tienen visibilidad por línea de vista y adquieren datos de imagen de la superficie terrestre dentro de la vista del sensor MODIS en este lapso de tiempo (ver capítulo 1).

Este método alternativo de adquisición de datos de imagen desde MODIS minimiza la latencia de las imágenes y datos de detección de fuego derivados para proveer una perspectiva en "tiempo real" de la situación actual de fuegos.

PROCESAMIENTO OPERACIONAL DE IMAGEN MODIS Y DETECCIÓN DE FUEGOS ACTIVOS

Después de la temporada de incendios del 2000, analistas de RSAC iniciaron la coordinación con miembros del equipo para Productos MODIS de Fuegos y Anomalías Térmicas de la Universidad de Maryland (UMd) y GSFC para determinar cómo sacar provecho de las capacidades de MODIS para la detección y el mapeo operativo de incendios con base diaria para el conjunto EU y Alaska.

Los productos derivados de MODIS adquiridos del Centro de Archivo Activo de Distribución de Procesos Terrestres (LPDAAC) no están disponibles para los días siguientes a la adquisición de imagen MODIS, disminuyendo en gran medida su utilidad para la evaluación y mapeo de fuego operacional a diario. Sin embargo

versiones, operacionales o en tiempo real, de productos MODIS relacionados con el fuego podrían ser utilizados por RSAC para generar productos de información geoespacial sobre fuego de valor agregado para apoyar el manejo a diario del fuego por el servicio forestal y otras agencias federales de manejo de tierras.

Respuesta rápida MODIS

Como resultado de esta coordinación GSFC y OMD desarrollaron un sistema de procesamiento de datos MODIS en GSFC llamado respuesta rápida para proveer casi en tiempo real la imagen de reflectancia corregida de MODIS y los puntos de detección de fuego basados en el algoritmo de anomalías termales y de fuego afin de cubrir las necesidades operacionales del Servicio Forestal (Sohlberg et al., 2001; Carroll et al., 2002; Descloitres et al., 2002). En el marco de respuesta rápida GSFC, los datos MODIS en bruto se bajan del sensor al Sistema de Operaciones y Datos EOS (EDOS) en White Sands, Nuevo México a través del Sistema Satelital de Difusión y Seguimiento de Datos (TDRSS). En EDOS los datos brutos se convierten a datos MODIS LO (esencialmente datos en bruto a los que se les quitaron los artefactos de comunicaciones) y se envían continuamente al proyecto de Procesamiento de Casi Tiempo Real NOAA MODIS”.

Para acelerar el procesamiento de las imágenes en bruto para los productos de mapeo de fuego, una copia de los datos LO entrantes es reenviada simultáneamente desde las oficinas NOAA al GSFC donde son procesadas al nivel L1B (datos geolocalizados y divididos en segmentos de 5 minutos y posteriormente procesados en series de datos de detección de fuego e imagen L2). El procesamiento de imagen LO a L1B se completa usando el Paquete de Procesamiento Internacional MODIS/AIRS (IMAPP) (IMAPP, 2004). Los datos de detección de fuego e imagen M2 se generan a partir de datos L1B usando aplicaciones desarrolladas por GSFC para el proyecto de Respuesta Rápida.

El sistema MODIS de Respuesta Rápida en GSFC procesa diariamente imágenes MODIS Terra y Aqua adquiridas para el mundo entero. La detección de la ubicación del fuego en bruto se obtiene de los datos MODIS en GSFC a los pocos minutos de recibir los datos LO desde NOAA. Sin embargo, debido a la demora de tiempo requerido para el envío de los datos de MODIS desde el sensor hasta GSFC, los datos derivados están disponibles por lo regular de dos a cuatro horas después de su adquisición.

Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS del Servicio Forestal USDA

El Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS del Servicio Forestal USDA es un programa operacional de monitoreo y mapeo de detección de fuego basado en datos de satélite. El objetivo principal del programa es proveer a tiempo productos geoespaciales derivados de satélite, imágenes y datos analíticos que caracterizan condiciones de fuego en proceso sobre amplias zonas geográficas. El programa actualmente provee productos de monitoreo y detección de fuego cotidianamente para los Estados Unidos continentales, Alaska, Hawaii y Canadá. La disponibilidad de estos productos por todo el año provee un monitoreo continuo de la actividad del fuego a través de las diferentes temporadas de incendio en el continente.

Los datos y productos geoespaciales producidos por el programa están planeados como herramientas de apoyo en las decisiones integradas en la planeación estratégica hecha por los encargados administrativos de incendios forestales nacionales y regionales. La información oportuna y los productos se utilizan también para otros objetivos de monitoreo y manejo del fuego y sirven también como una valiosa herramienta de información pública. El conjunto de información y productos de mapeo del fuego se proveen a través del sitio de Internet del programa en: <http://activefiremaps.fs.fed.us>.

El Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS nivela las observaciones reflectivas de superficie y térmicas de alta temporalidad realizadas por el sensor MODIS a bordo de los satélites EOS Terra y Aqua de la NASA. Los datos derivados de las imágenes MODIS se utilizan para generar datos de detección de fuego activo de observaciones diurnas y nocturnas y datos corregidos de reflectancia de la superficie para observaciones diarias. Los datos de detección de incendios identifican y caracterizan las ubicaciones del fuego con resolución de un kilómetro mientras las bandas multiespectrales coregistradas para sensores remotos de superficie terrestre se adquieren a una resolución de 250 a 500 metros. La vista sinóptica y la configuración orbital de ambos sensores MODIS facilitan observaciones diarias múltiples para el monitoreo y la detección del fuego. Con el objeto de mejorar la utilidad de los datos crudos de detección de fuego MODIS las ubicaciones de detección del fuego en casi tiempo real derivadas del sistema de Respuesta Rápida GSFC se envían continuamente al RSAC para su posterior procesamiento. RSAC diseñó e implementó una aplicación geoespacial llamada

Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS del Servicio Forestal USDA que procesa la salida en bruto del sistema de Respuesta Rápida para crear y mantener actualizados cotidianamente y de manera acumulativa conjuntos de datos de detección de fuego MODIS a lo largo de todo el año para todo Norteamérica. El programa saca provecho de estos conjuntos de datos dinámicos para generar un conjunto de productos analíticos y de mapeo de fuego que se actualizan varias veces diariamente y se distribuyen vía Internet.

Integración de tecnologías de transmisión directa y respuesta rápida para la cobertura de detección del fuego en tiempo real.

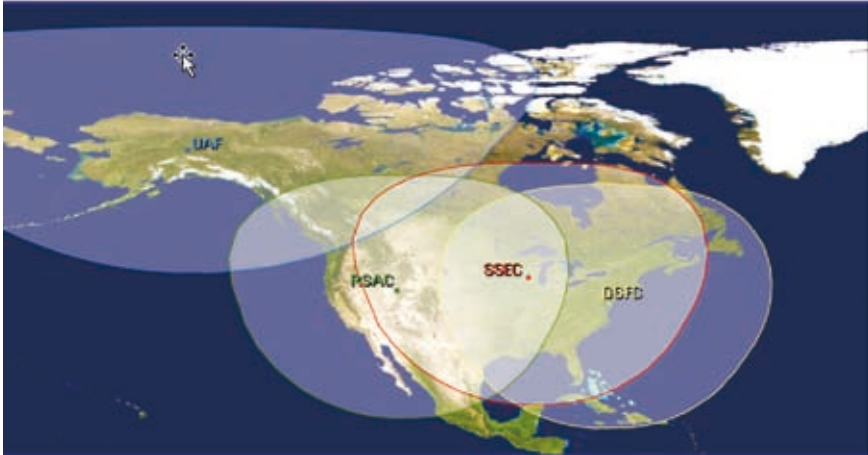
En un esfuerzo por proveer información y datos de detección de fuego más en tiempo para el oeste de los Estados Unidos en sitios propensos al fuego a fines de 2001 RSAC instaló una estación de lectura directa MODIS en el sitio en South Lake City, Utha (Figura 3).

RSAC colecta imágenes MODIS todo el año vía transmisión directa desde los pases MODIS Terra y Aqua dentro del alcance de la estación de lectura directa RSAC. La ubicación geográfica de la estación de lectura directa RSAC facilita la adquisición de datos MODIS en tiempo real para la mayoría de los Estados Unidos continentales con cobertura substancial del sur de Canadá y el norte de México. La cobertura del programa se mejora aún más por medio de una red de estaciones terrestres de lectura directa MODIS ubicados en el Centro de Ingeniería de Ciencias del Espacio (SSEC) en la Universidad de Wisconsin, Madison, en Madison, Wisconsin; y la Red de Información Geográfica de Alaska (GINA) en la Universidad de Alaska en Fairbanks (Figura 4). Cada estación terrestre recibe datos de transmi-

FIGURE 3. ESTACIÓN DE LECTURA DIRECTA DEL CENTRO DE APLICACIONES DE MONITOREO REMOTO DEL SERVICIO FORESTAL (RSAC) , SALT LAKE CITY, UTAH



FIGURA 4. EXTENSIÓN DE COBERTURA MÁXIMA TEÓRICA DE TERRA Y AQUA MODIS DE LA ESTACIÓN DE LECTURA DIRECTA PARA NORTE AMÉRICA PROVISTO POR EL CENTRO DE APLICACIONES DE SENSORES REMOTOS DEL SERVICIO FORESTAL (RSAC), EL CENTRO DE VUELO ESPACIAL GODDARD (GSFC), EL CENTRO DE INGENIERÍA DE LAS CIENCIAS DEL ESPACIO (SSEC) EN LA UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON Y LA UNIVERSIDAD DE ALASKA-FAIRBANKS (UAF)



sión directa MODIS Terra y Aqua en tiempo real. En conjunto, las tres estaciones terrestres permiten la obtención de datos de lectura directa las 24 horas todo el año para casi toda Norte América.

Después de cada adquisición de datos MODIS las detecciones de fuego se extraen inmediatamente de las imágenes usando la última versión del algoritmo de detección de fuego MODIS (ver capítulo VI). Ambos pases de día y de noche se procesan usando las mismas aplicaciones y algoritmos utilizados por el sistema de Respuesta Rápida GSFC.

Además las imágenes de reflectancia de MODIS adquiridas de día se procesan con RSAC RRS para generar subconjuntos personalizados de áreas de fuego activo.

La implementación de la estación de lectura directa RSAC reduce aún más la espera de disponibilidad de datos para los equipos de combate contra incendios de unas cuantas horas a menos de una hora en el oeste de Estados Unidos.

Los datos de detección de fuego MODIS colectados por cada una de las estaciones terrestres se complementan con datos de detección de fuego del Sistema de Respuesta Rápida GSFC de la NASA. El Sistema de Respuesta Rápida GSFC de la NASA adquiere y procesa diariamente datos de imágenes MODIS directa-

mente de la cadena de procesamiento de datos MODIS global vía el sistema de Procesamiento MODIS Casi Tiempo Real NOAA. Los datos GSFC de la NASA disponibles por lo regular de dos a cuatro horas después de que se adquieren proveen datos redundantes y llenan cualquier espacio vacío de datos que pueda ocurrir en la cobertura de tiempo real de la red de estaciones terrestres. Los datos se recopilan y procesan continuamente por el RSAC para mantener una serie de datos de detección de fuego acumulativa y actualizada para Norte América. Los datos de reflectancia de superficie MODIS adquiridos por la estación terrestre RSAC y la serie de datos MODIS global vía GSFC también se procesan y utilizan para generar subconjuntos de imágenes de fuego MODIS.

PRODUCTOS DEL PROGRAMA DE MAPEO DE FUEGO ACTIVO MODIS DEL SERVICIO FORESTAL USDA

Desde la temporada de incendios de 2001, RSAC ha procesado las imágenes de salida de detección de fuego del sistema de Respuesta Rápida para recopilar esfuerzos de mapeo de fuego activo MODIS y sus productos analíticos. Se pretende que los productos sean para el Servicio Forestal y la comunidad de interagencias de Fuego y se proveen de forma no restringida en el sitio web del Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS del Servicio Forestal USDA en <http://activefiremaps.fs.fed.us>. Los productos de mapeo de Fuego Activo MODIS actuales se resumen a continuación:

Las copias impresas de mapas de fuego activo MODIS

Las copias impresas de mapas de fuego activo MODIS son mapas regionales y nacionales tamaño cartel que en su conjunto cubren todo el territorio continental de los Estados Unidos y Alaska (Figura 5 – mapa regional). Estos mapas representan detecciones de fuego activo MODIS que ocurren dentro de las últimas 12 y 24 horas de la publicación del mapa además de la cantidad acumulada de detecciones de fuego MODIS previa durante el año en curso. Los mapas se recopilan en formatos promedio e incluyen características cartográficas relevantes como nombres de grandes fuegos actuales, límites políticos, ciudades, carreteras, hidrología y topografía.

Treinta y siete mapas están siendo recopilados y actualizados varias veces al día dependiendo de la actividad del fuego. Los límites del mapa coinciden con áreas

FIGURA 5. SUBCONJUNTO DEL MAPA DE FUEGO ACTIVO MODIS PARA EL ÁREA GEOGRÁFICA NOROESTE EN LA TARDE DEL 20 DE AGOSTO DEL 2001. LAS ÁREAS ROJAS Y ÁREAS NARANJAS REPRESENTAN ACTIVIDAD DE FUEGO EN LAS ÚLTIMAS 12 Y 24 HORAS RESPECTIVAMENTE; LAS ÁREAS AMARILLAS REPRESENTAN DETECCIONES DE FUEGO PREVIAS AL PERÍODO DE LA ÚLTIMAS 24 HORAS



geográficas interinstitucionales designadas por las agencias de fuego y área silvestre y se producen en tiempos designados estratégicamente para coincidir con los pases diarios del MODIS Terra y Aqua.

Subconjuntos de Fuego de Imagen MODIS

Los subconjuntos de fuego de imágenes MODIS son secciones seleccionadas de grandes fuegos en proceso en imágenes multispectrales georeferenciadas diariamente del oeste de los Estados Unidos (Figura 6).

Los subconjuntos se generan de datos transmitidos directamente del MODIS Terra y Aqua adquiridos vía la estación de lectura directa RSAC a minutos del paso del MODIS. Los subconjuntos se proveen en una variedad de formatos de imagen estándar (TPEG, GeoTiff y binario genérico) compatibles con la mayoría de los sistemas de información geográfica (SIG) y programas de análisis de datos de percepción remota. Los subconjuntos del fuego MODIS son útiles para evaluar condiciones de humo y delimitar áreas quemadas.

Mapas de fuego activo basados en la Red MODIS

Los mapas de fuego activo basados en la red MODIS son mapas interactivos para los Estados Unidos continentales y Alaska (Figura 7). Los mapas interactivos facilitan la integración de varias capas geoespaciales relacionadas al fuego con los datos de detección de fuego MODIS. Además de capas cartográficas básicas provistas de copias impresas de los mapas de fuego activo MODIS, las capas incluyen imágenes LANDSAT y MODIS, las condiciones climáticas previstas y observadas, y condiciones de combustible, estado del terreno federal y otras capas de información geoespacial pertinentes. Las detecciones de fuego MODIS que reflejan actividad de fuego en las últimas 12 y 24 horas así como las detecciones de fuego previo se actualizan cada hora. Datos de detección de fuego de sensores de resolución no refinada incluyendo AVHRR y los Satélites Medioambientales Operacionales Geoestacionarios (GOES) también están disponibles y se actualizan cada hora.

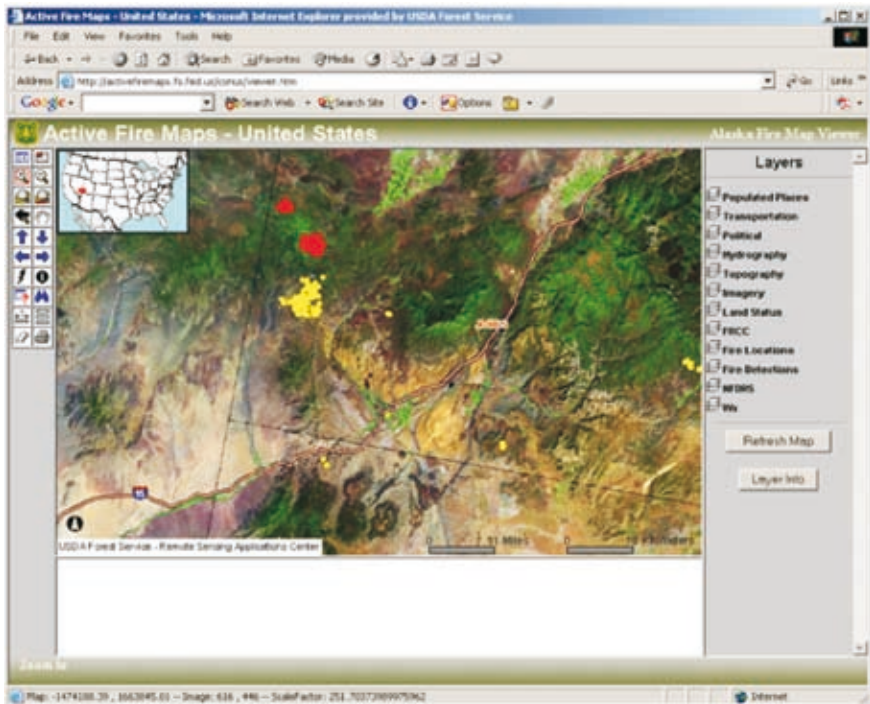
Datos GIS de detección de fuego MODIS

Los datos GIS de detección de fuego MODIS incluyen conjuntos de datos de detecciones acumulativas de incendios con información pertinente de sus atributos

FIGURA 6. LA COMPOSICIÓN DE FALSO COLOR MODIS Aqua (IZQUIERDA) Y COMPOSICIÓN DE COLOR VERDADERO (DERECHA) PARA EL SUR DE CALIFORNIA ADQUIRIDOS EL 17 DE SEPTIEMBRE DE 2006. EL FRENTE DE FUEGO ACTIVO Y ÁREAS QUEMADAS DEL FUEGO DE DÍA ES VISIBLE EN LA COMPOSICIÓN DE FALSO COLOR



FIGURA 7. MAPA BASADO EN LA RED DE FUEGO ACTIVO MODIS TOMADO DE CERCA EN EL SUDOESTE DE UTAH. VARIAS CAPAS GEOSPACIALES ESTÁN DISPONIBLES PARA DESPLEGARSE CON LOS DATOS DE DETECCIÓN DE FUEGO



para el análisis y mapeo (Figura 8). Los conjuntos de datos anuales de resolución de un kilómetro se proveen para Norte América por año desde 2001 y se proveen en formatos SIG aceptados universalmente junto con metadatos del Comité de Datos Geoespacial Federal (FGDC). Los datos para el año calendario en curso se actualizan y se proveen cada hora (Figura 8).

Contenido KMZ de Google Earth

Los archivos KMZ para cada área geográfica describen los datos de detección de fuego MODIS de los últimos 7 días categorizados según ocurren dentro de las últimas 12 horas, 12 a 24 horas y los 6 días previos al último período de 24 horas (Figura 9). Las ubicaciones de incidentes de grandes fuegos en curso en áreas na-

turales también se incluyen en el conjunto del archivo. Las KMZs pueden utilizarse en la aplicación Google Earth. Los archivos KMZ proveen cobertura para CONUS, AK, HI, Canadá y se actualizan cada hora.

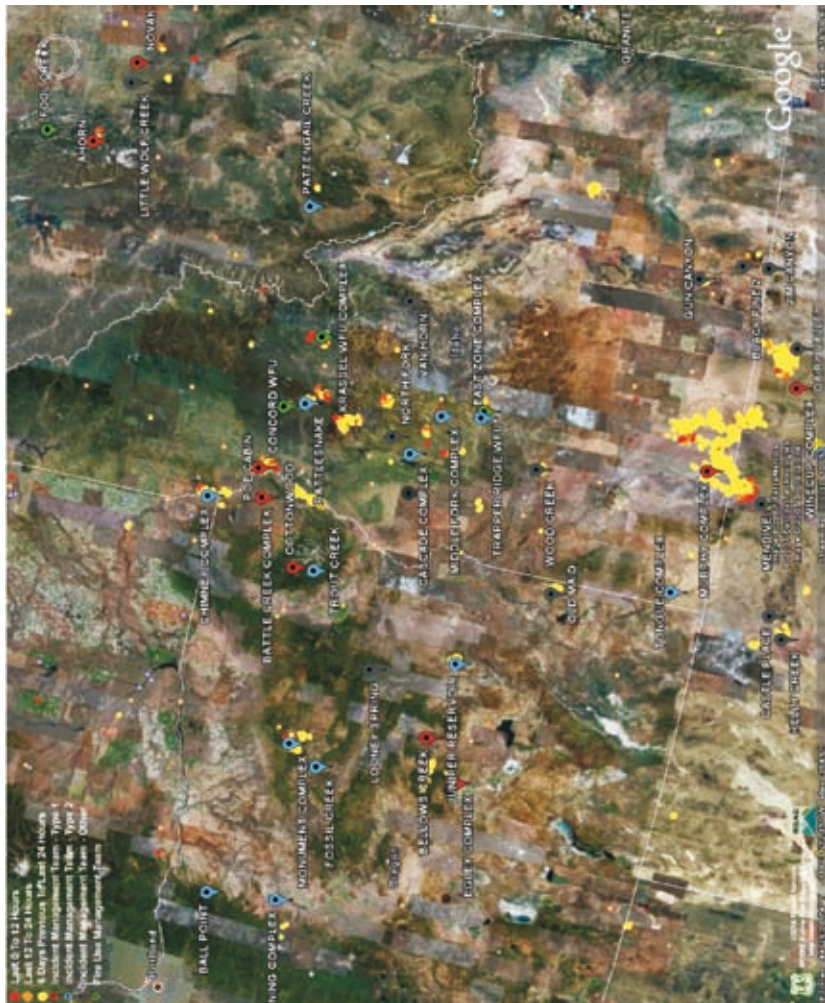
Información de Detección Actual MODIS

La información de detección actual MODIS es un resumen tabular analítico de todas las detecciones MODIS que ocurren en los Estados Unidos continentales y Alaska en el período de las últimas 24 horas. El resumen por hora incluye un mapa de detección a pequeña escala de los Estados Unidos con una caracterización geoespacial detallada para cada detección de fuego MODIS.

FIGURA 8. DATOS DE DETECCIÓN DE FUEGO MODIS DE TERRA Y AQUA PARA NORTE AMÉRICA 2003



FIGURA 9. DETECCIONES DE FUEGO MODIS MOSTRADAS EN GOOGLE EARTH



LA APLICACIÓN DE PRODUCTOS DEL PROGRAMA DE MAPEO DE FUEGO ACTIVO MODIS PARA EL MANEJO DE FUEGO

Los mapas de detección de fuego e imágenes MODIS y otros productos geoespaciales de fuego derivados provistos por el Programa de mapeo de fuego activo MODIS del Servicio Forestal USDA son utilizados diariamente para la evaluación de fuego a nivel regional y nacional. Dada la resolución de las imágenes MODIS y los datos de detección de fuego derivados, los productos de fuego MODIS no se recomiendan para la evaluación táctica a nivel incidente. Se pretende que los productos de fuego MODIS se usen para la evaluación y monitoreo de actividad de fuego a escala regional y nacional y para la planeación estratégica y la respuesta. Los productos de mapeo de fuego activo MODIS permiten brindar apoyo a varias necesidades operacionales en relación al fuego dentro del Servicio Forestal y la comunidad de interagencias de combate al fuego. Estas necesidades incluyen la detección y monitoreo de actividad de fuego en su totalidad diariamente, condiciones de humo y evaluación de áreas quemadas, reporte de la situación de fuego diario de quienes manejan el fuego en NIFC, y el reconocimiento aéreo y el mapeo de detección de fuego en regiones de alta actividad de fuego. Además, los productos de mapeo de fuego activo MODIS son también una excelente fuente de información sobre incendios para el público en general y ha sido usado de manera extensiva por los medios locales y nacionales.

El valor y la utilidad de los productos de fuego MODIS en tiempo real y casi tiempo real también han propiciado la expansión del Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS para incluir otras áreas de Norte América. Después de la severa temporada de incendios de 2003 en el oeste de Canadá, varias provincias y territorios canadienses se coordinaron con RSAC para expandir el desarrollo de productos de mapeo diario de fuego activo MODIS a Canadá. Como resultado, desde principios de 2004, un conjunto de productos de mapeo de fuego activo MODIS similar a aquellos que ya se proveen para los Estados Unidos son producidos por RSAC y se proveen en el sitio de Internet de mapeo de fuego activo MODIS de Canadá (<http://activefiremaps.fs.fed.us/canada>). Estos productos han sido bien recibidos por los equipos contra incendios canadienses y aumentan su capacidad de detección y monitoreo de fuegos, particularmente en áreas remotas. Subsecuentemente, a mediados del 2004, RSAC, GSFC y UMD se coordinaron con la Universidad de Alaska-Fairbanks (UAF) en la Red de Información Geográfica de Alaska (GINA) para implementar el Sistema de Respuesta Rápida en la universidad. El sistema de Respuesta Rápida UAF utiliza datos MODIS de tiempo real recolectados en la estación de lectura directa UAF en

Fairbanks, Alaska. RSAC adquiere datos de detección de fuego MODIS en tiempo real derivados directamente de UAF para su integración en el Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS. Esta implementación permite al Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS sacar provecho de las capacidades de lectura directa de RSAC y UAF para proveer una cobertura de detección de fuego en tiempo real para la mayoría de Norte América en conjunción con la cobertura de detección de fuego de casi tiempo real para el resto del continente provisto por GSFC. Además, todos los datos se procesan usando los mismos algoritmos lo que garantiza la consistencia en los datos. Medidas de coordinación adicionales están en proceso con otras estaciones de lectura directa MODIS en un esfuerzo por proveer una cobertura de detección de fuego en tiempo real para todo Norte América.

CONCLUSIONES

Las características del sensor MODIS combinadas con la metodología operacional descrita aquí provee datos geoespaciales y productos de mapeo en tiempo y forma, que representan herramientas valiosas en la evaluación y manejo diario de los incendios. La rápida disponibilidad de estos datos y productos es resultado de la sinergia del sistema de Respuesta Rápida MODIS y del Programa de Mapeo de Fuego Activo MODIS del Servicio Forestal USDA. El esfuerzo combinado de estos programas es un excelente ejemplo de la integración de instrumentos de percepción remota de punta, métodos de procesamiento de imágenes, procesamiento de datos geoespaciales y técnicas de análisis, y tecnologías de Internet.

El desarrollo de los respectivos programas y su integración muestra cómo la cooperación entre la investigación y otros elementos organizacionales dentro de la academia y el gobierno pueden crear un efecto de sinergia para lograr objetivos operacionales. Además, este ejercicio sirve como modelo para futuras misiones de satélites con capacidad de detección de fuego tales como el Conjunto de Radiómetro de Imagen Infrarroja Visible (VIIRS) en el Sistema de Satélite Medioambiental Nacional de Órbita Polar (NPOESS).

REFERENCIAS

Carroll, M., Descloitres, J., Giglio, L., Sohlberg, R., Finco, M., Quayle, B., Owens, J., Townsend, J., y Justice, C., "MODIS Land Rapid Response activities with the USDA Forest

- Service: time sensitive data acquisition to support wildfire management," *Proceedings of 2002 NASA Science Data Processing Workshop*, Greenbelt, MD, 2002.
- Descloitres, J., Sohlberg, R., Owens, J., Giglio, L., Justice, C., Carroll, M., Seaton, J., Crisologo, M., Finco, M., Lannom, K., and Bobbe, T., "The MODIS Land Rapid Response project," *IGARSS: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, Toronto, 2002.
- Dozier, J., "A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 11, pp.221-229, 1981.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., and Kaufman, Y. J., "An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS," *Remote Sensing of the Environment*, Vol. 87, pp. 273-282, 2003.
- IMAPP, International MODIS/AIRS Processing Package, Space Science Engineering Center, University of Wisconsin-Madison, 2004.
- Justice, C.O. Townshend, J.R. Vermote, E.F., Masuoka, E., Wolfe, R.E., Saleous, N., Roy, D.P., and Morisette, J.T., "An overview of MODIS Land data processing and product status," *Remote Sensing of the Environment*, Vol. 83, pp. 3-15, 2002.
- Justice, C. O, Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., and Kaufman, Y., "The MODIS fire products," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, pp.244-262, 2002.
- Matson, M., and Dozier, J., "Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 87, pp.273-282, 1981.
- NASA, MODIS Fire and Thermal Anomalies Guide, URL: <http://modis-fire.gsfc.nasa.gov/> [NASA online technical reference], [cited 25 August 2004].
- National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center, *MODIS Rapid Response System* [NASA online image database], URL: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/> [cited 25 August 2004].
- National Oceanic and Atmospheric Administration, *MODIS Near Real Time Processing* [NOAA online image database], URL: <http://www.osdpd.noaa.gov/MODIS/> [cited 25 August 2004].
- Prevedel, D., "Project Sparkey: A Strategic Wildfire Monitoring Package Using AVHRR Satellites and GIS," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, No. 3, 1995, pp. 271, 278.
- Sohlberg, R., Descloitres, J., and Bobbe, T., "MODIS Land Rapid Response: operational use of Terra data for USFS wildfire management," *The Earth Observer*, Vol.13, No.5, pp. 8-10,14, 2001.

- United States Geological Survey, "Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)," [USGS online technical reference], URL: <http://edc.usgs.gov/guides/avhrr.html>, [cited 25 August 2004].
- Wolfe, R. E., Nishihama, M., Fleig, A. J., Kuyper, J. A., Roy, D. P., Storey, J. C., & Patt, F. S. "Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS Land Science," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, pp. 31– 49, 2002.
- University of Alaska-Fairbanks, *Geographic Information Network of Alaska*, [University of Alaska online geospatial database], URL: <http://www.gina.alaska.edu/> [cited 25 August 2004].
- Zhan, X., Defreis, R., Townshend, J.R., Dimiceli, D., Hansen, M., Huang, C. and Sohlberg, R. "The 250 m Global Land Cover Change Product From The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth Observing System," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 6 & 7, pp. 1433-1460, 2000.

CAPÍTULO 8

Monitoreo de propiedades y procesos ecosistémicos con índices de vegetación MODIS

Alfredo R. Huete, Ramón Solano-Barajas, Edward P. Glenn, Natalia Restrepo-Coupe

RESUMEN

En este capítulo revisamos los importantes avances y las aplicaciones en el uso de índices de vegetación (IV) de MODIS como herramientas para el análisis y monitoreo de propiedades y procesos ecosistémicos, incluyendo aquellos relacionados con la fotosíntesis y la transpiración del dosel. Presentamos las características básicas de los productos IV-MODIS estándar, incluidas las series de tiempo, las medidas cualitativas, el método de composición y las incertidumbres presentes en las series de datos. Discutimos construcciones alternativas de las series de datos temporales de IV, incluyendo aquellos de la recepción directa de datos. Los perfiles de los IV interanuales y estacionales son presentados y analizados en varios sitios de cobertura terrestre en México y los IV MODIS son comparados con mediciones temporales de productividad bruta y evapotranspiración de ecosistemas realizadas con torres de medición de flujo en La Paz, Baja California Sur. Se muestra que los IV-MODIS son herramientas de inestimable valor en el estudio temporal de las dinámicas de los ecosistemas.

INTRODUCCIÓN

Mediciones por percepción remota de las propiedades biofísicas de la vegetación y de los procesos ecosistémicos en los paisajes terrestres son importan-

tes para un amplio rango de ciencias así como temáticas relacionadas con el manejo de recursos y el desarrollo sostenible. El uso de Índices de Vegetación (IV) para el monitoreo y manejo de paisajes terrestres con sensores satelitales fue inicialmente desarrollado en los años 1970 e implementado operativamente desde 1981 con los datos globales del Índice de Vegetación Diferenciado Normalizado (NDVI) del sensor NOAA Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR). Muchos de los avances recientes en Ciencias de la Tierra, relacionados con los ciclos biogeoquímicos, la producción primaria neta, y las respuestas de la vegetación a las fluctuaciones interanuales y a los impactos de El Niño-Oscilación Sur (ENOS), pueden ser atribuidos al desarrollo y la calidad del registro de series de tiempo NDVI-AVHRR (Gutman, 1994; Tucker et al, 1991; Myneni et al, 1997).

Una nueva generación de datos satelitales de los sensores del espectroradiómetro para imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo de las plataformas EOS Terra y Aqua, registra ahora globalmente de radiancia en 36 bandas, incluyendo 7 bandas para la observación de la cubierta terrestre en las regiones del visible, infrarrojo cercano, e infrarrojo de onda corta con 250 m ó 500 m de resolución. En contraste con los amplios anchos de banda de AVHRR, el sensor MODIS tiene anchos de banda mucho más angostos, lo que en el caso del infrarrojo cercano (841-876 nm) evita la contaminación atmosférica por vapor de agua. Más aún, MODIS provee un conjunto de productos estándar que están basados en las estimaciones de reflectancias espectrales de superficie corregidas atmosféricamente. El producto estándar IV-MODIS incluyen el NDVI y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) para cuantificar los estados y procesos de la vegetación, y para caracterizar la información biofísica y bioquímica que puede ser extraída de las cubiertas vegetales (ver capítulo II).

Los IV se han convertido en herramientas indispensables en estudios de la productividad y la fenología, las interacciones clima-vegetación, la clasificación de la cubierta terrestre, la detección de cambios en el uso del suelo, el monitoreo de sequías, la biodiversidad, la pérdida de hábitat, la salud pública, y en muchas otras aplicaciones ecológicas. En este capítulo revisamos el uso y la calidad de las series temporales de datos de IV obtenidos del instrumento MODIS, su base teórica, y su uso en la evaluación de las variables biofísicas de la vegetación y de los procesos ecosistémicos.

REVISIÓN Y BASE TEÓRICA DE DATOS DE SERIES TEMPORALES DE MODIS VI

Los índices de vegetación son productos sistemáticos y continuos, calculados para todos los píxeles de la misma forma en el espacio y el tiempo, sin importancia del tipo de bioma, condición de cobertura terrestre, y tipo de suelo, y representan así mediciones fieles de la superficie. Constituyen la medidas ópticas del verdor de la vegetación del dosel, una propiedad compuesta del contenido de clorofila de las hojas, el área de hojas, la cobertura de dosel y su estructura (la del dosel). Un IV mide el contraste entre la señal en la región espectral del rojo, absorbida por la clorofila, y la señal de reflectancia no-absorbente de la hoja en el infrarrojo cercano (IRC) para cuantificar la cantidad y el vigor de la vegetación. Existen diversas posibilidades de combinar las bandas rojas y las IRC para estimar el grado de verdor, llevando a una multitud de ecuaciones de IV, incluyendo cocientes de bandas espectrales, diferencias normalizadas, combinaciones de banda lineales, y combinaciones de banda optimizadas (Gobron et al., 2000; Huete, 1988; Tucker, 1979). Un aspecto importante del desempeño de los IV se relaciona con su habilidad en capturar fenómenos biofísicos esenciales con la fidelidad adecuada y minimizando las influencias externas (atmósfera, ángulos solares y de visión, suelo, vegetación no-fotosintética).

El NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) es una variante funcional del cociente entre la reflectancia en el rojo y el infrarrojo cercano, que provee valores de verdor normalizados entre -1 y $+1$ (ver capítulo II). Una ventaja importante del NDVI, como cociente, es su habilidad de producir valores estables debido a la normalización de muchas fuentes externas de ruido. Esta habilidad de normalización fue particularmente útil en la era temprana de AVHRR, cuando los problemas de calidad de datos generados por el ruido del instrumento sensorial y la contaminación atmosférica eran particularmente importantes.

El NDVI también presenta algunas desventajas en estudios de paisaje, relacionados con el comportamiento no-lineal de los cocientes, la sensibilidad a las propiedades del suelo y la saturación en caso de densidades de vegetación moderadas a altas. Por ejemplo, en estudios basados en datos de campo y en modelos, se observan fuertes relaciones entre variables biofísicas y el NDVI a escala local, sin embargo, cuando estas relaciones se expanden espacialmente, los valores NDVI pueden responder a las variaciones espaciales del suelo en áreas de vegetación con dosel abierto. Un píxel de vegetación con suelo más oscuro o húmedo tiende a tener un valor más alto de NDVI (hasta dos veces) que un píxel equivalente con suelo claro o seco (Huete, 1988). Una aproximación de la ley de Beer de primer

orden a la transferencia radiativa Suelo-Vegetación permite remover la influencia de la señal que se refleja del suelo, y lleva a la derivación del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI por sus siglas en inglés):

$$SAVI = (1 + L) \frac{R_{IRC} - R_R}{L + R_{IRC} + R_R} \quad (1)$$

donde R_{IRC} y R_R son reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano (IRC) y del rojo respectivamente, y L es el factor de ajuste de suelo (Huete, 1988).

El Índice Mejorado de Vegetación (EVI) es una combinación optimizada de las bandas en el azul, rojo e IRC, diseñadas para extraer los valores del verdor del dosel, independiente de las variaciones subyacentes del suelo y de los aerosoles atmosféricos, y se deriva del SAVI y del Índice de Vegetación de Resistencia Atmosférica (ARVI por sus siglas en inglés) (Kaufman y Tanré, 1992) (Ver Capítulo 2).

$$EVI = 2.5 \frac{R_{IRC} - R_R}{R_{IRC} + C_1 R_f - C_2 R_A + L} \quad (2)$$

donde R_A es la reflectancia en la banda azul; L es el factor de ajuste del fondo del dosel, y C_1 y C_2 son los pesos de resistencia del aerosol. Aunque los datos MODIS de la reflectancia de la superficie son corregidos atmosféricamente, el término de resistencia del aerosol estabiliza el ruido residual del aerosol residual del algoritmo de corrección atmosférica, tales como los píxeles sobre y sub-correctos, y las atmósferas horizontalmente heterogéneas. Los coeficientes de la ecuación EVI en los productos estándar MODIS son $L=1$; $C_1=6$ and $C_2=7.5$.

SERIES DE DATOS TEMPORALES DE IV-MODIS

Las series de tiempo IV-MODIS están disponibles en el LP-DAAC (Centro de Distribución de Archivos Activos de Procesos Terrestres <www.lpdaac.usgs.gov/dataproducts.html>) como productos como productos estándar de la serie IV (MOD13). Los IV pueden también ser generados directamente de las series de productos de reflectancia de superficie (MOD09), de las series de productos de reflectancia de superficie bidireccional ajustados al nadir (MOD43, NBAR), y fi-

nalmente, de los productos de reflectancia e IV de lectura directa (Tabla 1). Estos proveen un rango de conjuntos de datos de IV para una amplia variedad de aplicaciones para la comunidad de usuarios, a resoluciones espaciales que varían de 250 m a 0.05 grados de resolución y a resoluciones temporales diarias, de 8 días, 16 días y mensuales.

TABLA 1. DATOS DE SERIES TEMPORALES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN QUE PUEDEN OBTENERSE A PARTIR DE DATOS MODIS.

Producto	Satélite/ Sensor	Resolución temporal/ espacial
Índice de vegetación, nivel 3, MOD13Q1, versión 5	Terra, Aqua MODIS	8-días (combinado)/ 250 m
Reflectancia de la superficie, nivel 3 MOD09, versión 5	Terra, Aqua MODIS	8-días/ 500 m
Reflectancia de la superficie, nivel 2G, MOD09GA, versión 5	Terra, Aqua MODIS	Diario/ 250 m, 500 m
Índices de vegetación, calculados con base en nivel 2G MOD09GA	Terra, Aqua MODIS	Diario/ 250 m
Reflectancia de la superficie, lectura directa, MOD09_SPA (versión 5.3.18)	Terra, Aqua MODIS	Diario/ 250 m
Índices de vegetación, lectura directa (nivel 2) NDVI/EVI_SPA	Terra, Aqua MODIS	Diario/ 250 m

1.1.Productos estándar de IV-MODIS (MOD13)

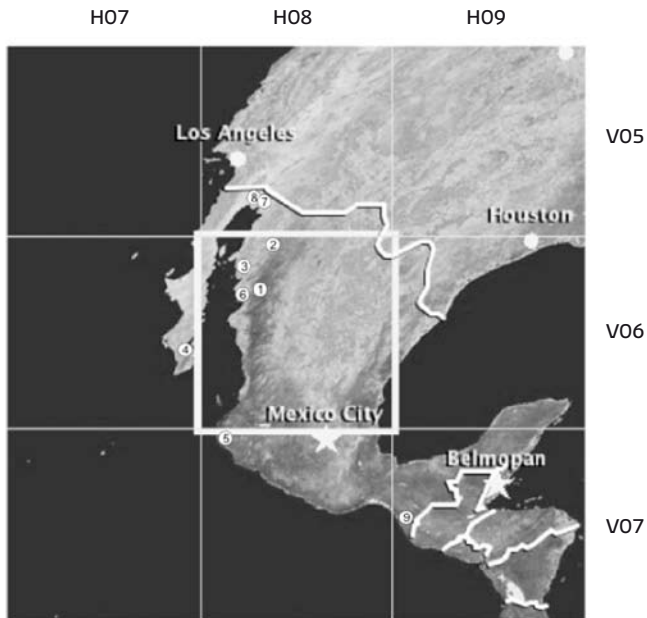
Existen seis productos estándar de IV-MODIS para cada instrumento MODIS Terra o Aqua, a diferentes resoluciones para capturar de la mejor manera las complejidades temporales y espaciales asociadas con la dinámica de la vegetación y los procesos hidrológicos y biogeoquímicos (ver Tabla 10, Capítulo II). Esto incluye productos de resolución moderada de 250 m, 500 m y 1 Km, y baja resolución de 0.05° (~5.6 Km en la Malla de Modelado Climático, CMG) conjuntos de 16 días y mensuales (meses del calendario) para cubrir las necesidades de la comunidad de usuarios. Los productos se generan globalmente sobre unidades espaciales lla-

mosaicos (tiles) que comprenden un área de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ (aproximadamente 1200 km x 1200 km en el ecuador) en la proyección sinusoidal de igual área (Figura 1). En el caso de los IV de las mallas de modelado climático que son de resolución más gruesa, el producto es global y sin mosaicos.

Series de Datos Científicos y de Composición (SDS)

Los IV-MODIS estándar son calculados a partir de las reflectancias de superficies diarias atmosféricamente corregidas (MOD09), y luego compuestas sobre un intervalo temporal más extenso para eliminar la contaminación de nubes, aerosol y sombra de nube. Los IV se producen a intervalos de 16 días y mensuales usando un procedimiento de composición que aplica principalmente un filtrado de nubes y la información de calidad por píxel (QA). Después de descartar los píxeles de calidad más baja que presentan nubes residuales, sombras y alto contenido de aerosoles, se usa un método de composición de restricción del ángulo de visión y selección

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DE LOS MOSAICOS (TILES) MODIS Y DE LOS SITIOS DE ESTUDIO (VER TABLA 3)



del valor máximo (CV-MVC) para restringir el ángulo de medido desde el cenit, seleccionando las mediciones más cercanas al nadir de los dos valores de NDVI más altos. Así, los valores de los IV seleccionados representan mediciones del dosel superior a un ángulo del cenit solar local y similar a la de geometrías de visión nadir (ver Capítulo II).

Si no hay píxeles de buena calidad disponibles dentro de un ciclo de agregación, se usa el criterio MVC donde se escoge el pixel de mayor valor de NDVI entre los píxeles de baja calidad. Para la mayoría de aplicaciones científicas, estos píxeles de baja calidad necesitan ser eliminados por el usuario. Los valores estándar de los IV-MODIS se escalan por 10,000 y se provee adicionalmente información de calidad para cada pixel, que es útil para evaluar el ruido y la imprecisión presente en el producto. En un estudio de composición de datos MODIS diarios para mapear el área quemada en la Península Ibérica, Chuvieco et al. (2005) encontraron que el procedimiento de composición MODIS estándar arrojó ángulos de observación cercanos al nadir y una buena coherencia espacial. Las series de productos IV MOD13 estándar proveen un Conjunto de Datos Científicos (SDS) para caracterizar las propiedades y calidad de cada pixel seleccionado (Tabla 2).

Los productos de IV de 500 m (MOD13A1; MYD13A1) y 1 km (MOD13A2; MYD13A2) se calculan a partir de las reflectancias de superficie de 250 m agregadas, mientras que el producto de IV de las Mallas de Modelado Climático (CMG, productos MOD13C1 y MYD13C1) se calcula con base en los valores de reflectancia de buena calidad, el promedio de todos los píxeles en un kilómetro cuadrado, agregados a 0.05° usando un esquema de filtrado QA que remueve los píxeles contaminados por nubes y aerosol. El producto agregado de IV-CMG incluye: (1) NDVI y EVI promediados, (2) número de píxeles de 1 km filtrados por calidad

TABLA 2. CONJUNTO DE DATOS CIENTÍFICOS (SDS) DE IV-MODIS QUE CARACTERIZAN LAS PROPIEDADES Y CALIDAD DE CADA PIXEL

Series de Datos Científicos IV MOD13	
Valor del NDVI compuesto	Día del compuesto
Valor del EVI compuesto	Fiabilidad del pixel
Reflectancia banda 1 (620-670 nm)	Angulo cenital del sensor
Reflectancia banda 2 (841-876 nm)	Angulo cenital solar
Reflectancia banda 3 (459-479 nm)	Acimut relativo (sol - sensor)
Reflectancia banda 7 (2105-2155 nm)	Capa QA de IV

(QA) usados al agregar a píxeles CMG, (3) la desviación estándar de NDVI y EVI de los píxeles de 1 Km de entrada, (4) el número de píxeles que están dentro del ángulo de 30° del cenit del sensor, (5) confiabilidad y calidad de los IV, (6) ángulo promedio de elevación solar, y (7) las reflectancias promediadas en el rojo, infrarrojo cercano, azul, e infrarrojo de ondas cortas. El producto mensual de IV-CMG es el promedio ponderado del número de valores de IV de 16 días dentro de un mes del calendario en particular.

En este capítulo, escogimos el mosaico H08V06 y extrajimos datos sobre una serie de sitios de estudio para el análisis posterior (Figura 1 y Tabla 3). Los conjuntos de datos científicos aportados por el producto estándar MODIS MOD13A2 para mosaico H08V06 se muestran en las figuras 2, 3, 4 y 6 para el primer período compuesto del año 2008 (días 1 a 16). Los valores compuestos de IV se muestran en la Figura 2 y podemos observar valores de IV más altos en la Sierra Madre Occidental a lo largo de la porción oeste de México. Gran parte del interior consiste en áreas de desiertos y pastizales con valores bajos de IV para esta imagen del mes de enero. Hay también valores de IV más altos a lo largo de la Sierra Madre Oriental en la parte central derecha del mosaico. Se observan valores altos de IV sobre la gran región agrícola por el Golfo de México (cosechas de invierno) localizada en la porción sureste del mosaico, así como valores más altos de IV en las regiones boscosas en la Sierra de Jalisco localizadas en la parte suroeste del Mosaico. Los valores de reflectancia correspondientes al rojo, infrarrojo cercano, azul e infrarrojo de ondas cortas para los píxeles seleccionados en los compuestos de VI se muestran en la Figura 3.

La Figura 4 muestra conjuntos de datos científicos adicionales que proveen el día y la geometría de observación para cada pixel seleccionado en el proceso de composición. La imagen compuesta final consiste en píxeles seleccionados de todas las fechas posibles dentro del período de composición de 16 días (Figura 4a). Habrá algunas diferencias observadas en los perfiles de serie temporal de IV-MODIS, cuando la 'fecha de adquisición exacta' se use en lugar de la 'fecha de composición', como se ilustra en la Figura 5. El mosaico de píxeles de diferentes fechas resulta en un ángulos de visión respecto al cenit, ángulos cenitales del sol, y ángulos azimutales relativos sensor-sol (Figuras 4 b,c,d). Los ángulos cenitales de visión del sensor estaban, en su mayoría, en el rango (tonos más oscuros en la Figura 4b). Los ángulos cenitales solares tienen un comportamiento más sistemático con ángulos incrementados de sur a norte durante este período de invierno. Los tonos claros en la Figura 4c corresponden las geometrías de visión de disper-

FIGURA 2. PRODUCTO ESTÁNDAR MOD13A2 NDVI (IZQUIERDA) Y EVI (DERECHA) PARA EL COMPUUESTO 2008-001 (TILE H08V06)

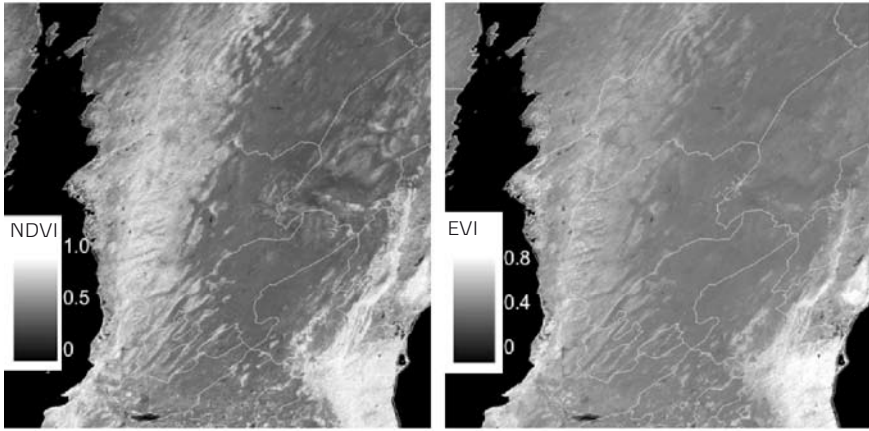


FIGURA 3. SERIES DE DATOS CIENTÍFICOS DE REFLECTANCIA DE MODIS (A) BANDA 1, ROJO; (B) BANDA 2, IRC; (C) BANDA 3, AZUL Y (D) BANDA 7, INFRARROJO DE ONDAS CORTAS, CONTENIDAS EN EL PRODUCTO DE IV MOD13A2 PARA EL COMPUUESTO 2008-001 (TILE H08V06)

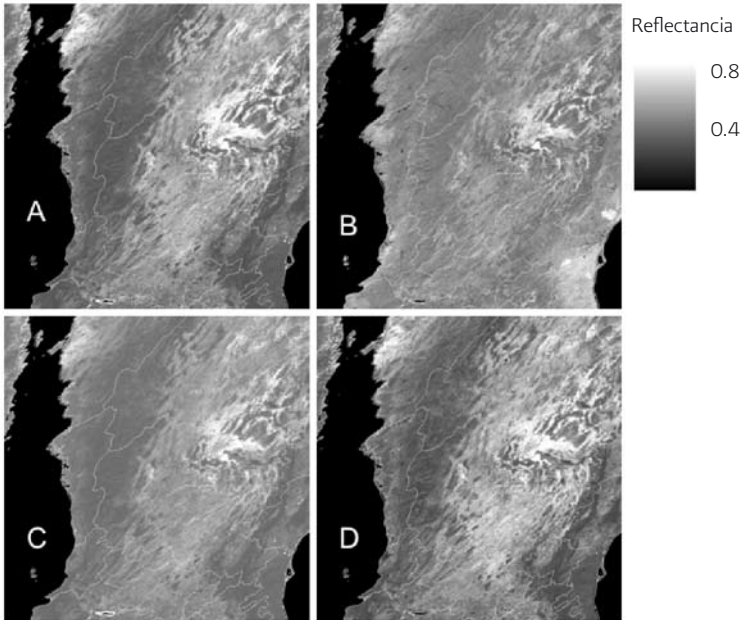


TABLA 3. SITIOS DE ESTUDIO SELECCIONADOS PARA LA EXTRACCIÓN DE IV DE TERRA MODIS (MOD13Q1, 250M) (2.25 KM X 2.25 KM) Y ANÁLISIS

Site Name	Lat./Long.	Land Cover Type	Reference
(1) Tesopaco, Sonora	27.85, -109.3	Bosque tropical deciduo	Watts et al. (2007)
(2) Rayón, Sonora	29.74, -110.54	Matorral subtropical	Watts et al. (2007)
(3) La Pintada, Sonora	28.52, -111.06	Matorral desértico con pasto Buffel	Watts et al. (2007)
(4) La Paz, Baja California Sur	24.129, -110.438	Matorral desértico	http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet
(5) Estación biológica de Chamela, Jalisco	19.509, -105.040	Bosque tropical deciduo estacional	http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet
(6) Valle Yaqui, Sonora	27.40, -110.10	Agricultura (Trigo de invierno)	Lobell and Asner (2004)
(7) Complejo volcánico del Pinacate, Sonora	31.772, -113.498	Desierto Hyperárido	http://www.unesco.org/mabdb/br/brdir/directory/biores.asp?mode=all&code=MEX+10
(8) Desierto de Altar, Sonora	31.800, -113.850	Desierto Hyperárido	
(9) Sierra Madre de Chiapas	15.64, -92.75	Bosque húmedo de hojas anchas	http://www.nationalgeographic.com/wildworld/terrestrial.html

sión frontal, mientras que los tonos oscuros representan adquisiciones de visión en retrodispersión (el sensor va “detrás” del sol), en las cuales los azimut del sol y del sensor están alineados más cercanamente. Puesto que el proceso de composición de los IV está diseñado usando el NDVI, tiende a sesgarse hacia la selección de pixeles de dispersión frontal, lo que produce valores de NDVI más altos.

Las capas finales de las SDS en los productos de IV-MODIS son una medida de la fiabilidad del pixel e índices de calidad del IV. La confiabilidad del pixel es una evaluación general de la calidad del IV que comprende cinco categorías (1) buena, (2) marginal, (3) presencia de nieve/hielo, (4) superficie cubierta por nubes, y (5) ausencia

FIGURA 4. CAPAS DE LOS DATOS CIENTÍFICOS: DÍA DEL COMPUESTO (A), ÁNGULO CENTRAL DE VISION DEL SENSOR (B), ÁNGULO ACIMUTAL RELATIVO SOL - SENSOR (C), Y ÁNGULO CENTRAL SOLAR (D), EN EL PRODUCTO ESTANDAR IV MOD13AZ PARA EL COMPUESTO 2008-001 (TILE h08v06)

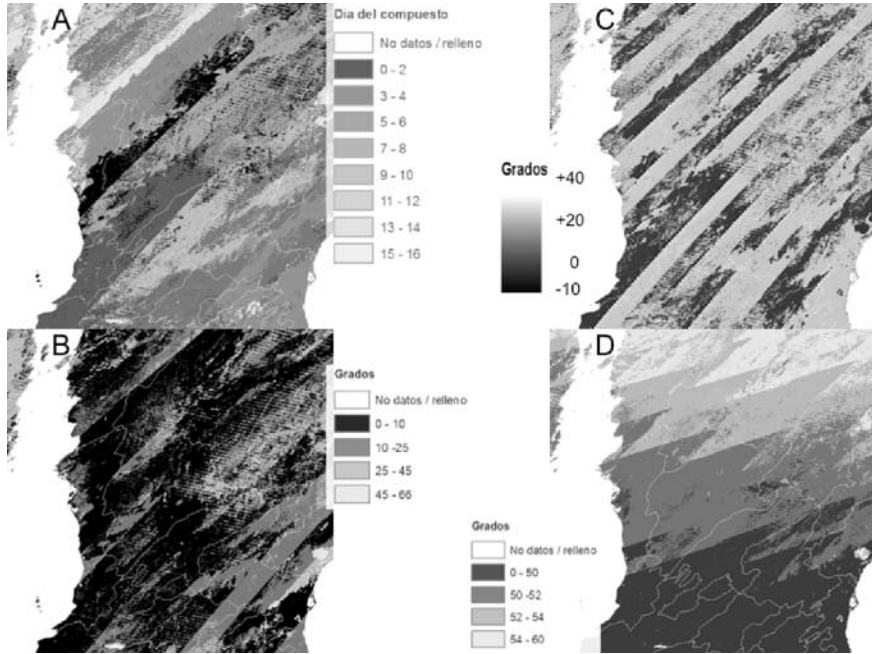
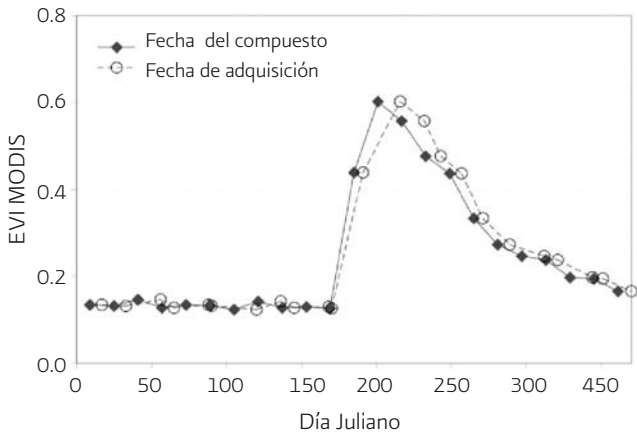


FIGURA 5. COMPARACIÓN ENTRE LAS SERIES DE TIEMPO IV-MODIS USANDO LA FECHA DE ADQUISICIÓN REAL CON BASE EN LOS DATOS CIENTÍFICOS Y LA FECHA DEL COMPUESTO ESTANDAR PARA EL AÑO 2006



de datos (Figura 6). La capa de calidad del IV está provista también con información de calidad mucho más detallada como el método de corrección y condiciones sobre aerosoles, correcciones atmosféricas BRDF, presencia y tipo de nubes, nubes adyacentes, sombra de nubes, máscara agua/tierra, y presencia de nieve y hielo.

Series de tiempo de IV-MODIS adicionales

Se pueden obtener series de tiempo de IV de 8 días combinando los productos de IV Terra y Aqua, que están 8 días desfasados, de tal modo que la serie temporal 16 días, combinada de MOD/MYD IV, puede generarse fácilmente (Figura 7). Por ejemplo, el primer compuesto MOD13 (DOY=1) comprende los días 1 al 16 mientras que el primer compuesto MYD13 (DOY=9) está compuesto de los días 9 al 24, resultando en una serie de tiempo combinada de 8 días Aqua y Terra (DOY 1, 9, 17, 25, 33, etc.), donde los valores en negrita son del MODIS-Terra y los otros de MODIS-Aqua. Otras maneras de generar series de datos temporales de IV incluyen el uso de las reflectancias de superficie del producto MOD09, de la reflectancia ajustada al nadir (NBAR) del producto MOD43, y los productos de reflectancia e IV de lectura directa (Tabla 1).

FIGURA 6. CAPA DE FIABILIDAD DEL PIXEL EN EL PRODUCTO IV ESTANDAR MOD13A2 PARA EL COMPUESTO 2008-001 (TILE H08v06)

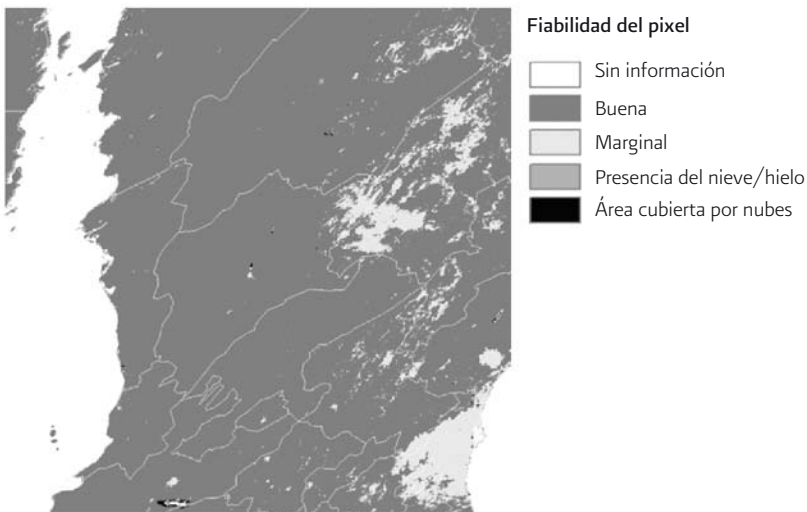
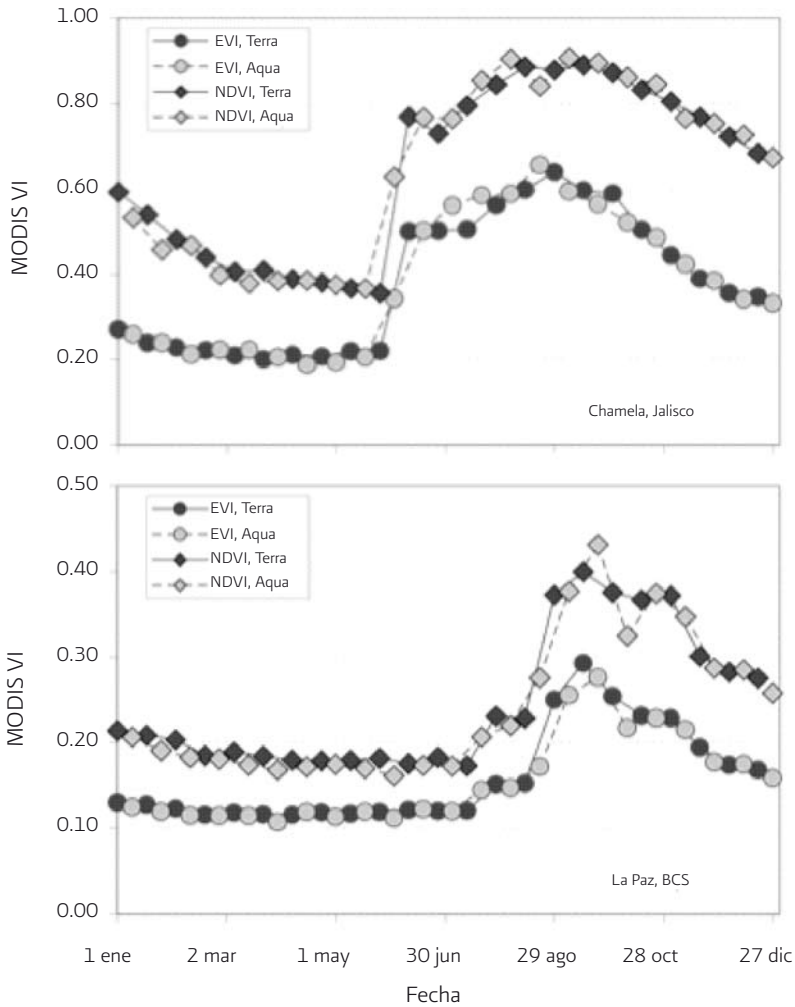


FIGURA 7. PRODUCTO COMBINADO TERRA Y AQUA DE IV-MODIS 8-DÍAS EN FASE PARA LOS SITIOS DE CHAMELA Y LA PAZ EN 2006

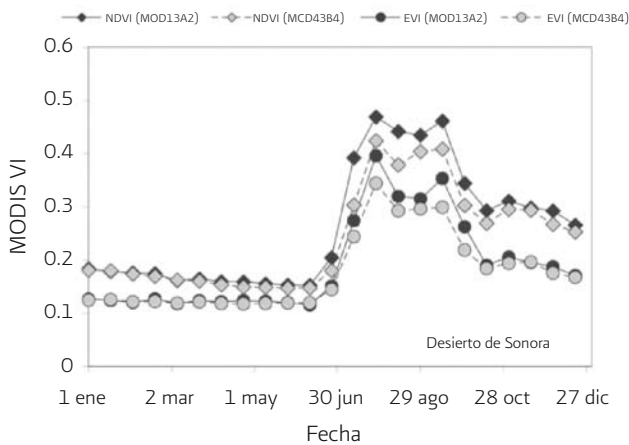


En general, los IV computados que usan las reflectancias MOD09 y MOD43 coinciden bastante bien con los valores de IV de MOD13, con algunas pequeñas diferencias asociadas con el método y período temporal de composición. Las re-

flectancias MOD09 están compuestas a 8 días usando una metodología de ‘azul mínimo’, mientras que los productos MODIS NBAR generan valores de reflectancia ajustada al nadir ‘modelados’ a través de inversiones del modelo BRDF aplicadas a siete o más adquisiciones de datos de buena calidad (QA) y libres de nubes dentro de 16 días, o de un ciclo compuesto de 8 días de datos combinados Aqua-Terra (Schaaf et al., 2002). Las reflectancias diarias de nivel 2G (producto MOD09GA) pueden ser compuestas con base en cualquier período, sin embargo hay un efecto de compensación entre la alta frecuencia de las series de tiempo y la calidad de los datos.

Hay un buen ajuste general entre los perfiles de series de tiempo de MOD13 y los IV derivado del producto MOD43, como se observa en la Figura 8, pero con valores ligeramente más altos para los IV derivados del producto MOD13 lo cual puede representar un sesgo positivo del ángulo de visión del sensor presente en el producto MOD13 o un sesgo negativo en el MOD43, posiblemente debido a la inclusión de pixeles con contaminación residual de nubes no detectada que podría disminuir el valor estimado del IV al nadir. Aunque el sesgo del ángulo solar puede ser significativo según la estación, es un problema menor en las series de datos temporales interanuales y el análisis de tendencia, siempre y cuando no haya desviación orbital del sensor (Los et al., 2005).

FIGURA 8. COMPARACIÓN DE PERFILES ESTACIONALES DE LOS PRODUCTOS ESTANDAR MOD13A2 Y NBAR-MCD43 PARA EL AÑO 2006



Datos de lectura directa MODIS

Las tecnologías de transmisión y lectura directa proveen el acceso a las imágenes de satélite casi en tiempo real para una variedad de aplicaciones de respuesta rápida, incluyendo detección de fuego y mitigación de desastres (ver capítulos V, VI y VII). Los algoritmos y herramientas de procesamiento de lectura directa están puestos a la disposición de la comunidad de percepción remota por el Laboratorio de Lectura Directa (<http://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov/>). La transmisión directa de datos MODIS en México está disponible a través del Portal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), donde datos y productos diarios están disponibles para la comunidad de usuarios el mismo día de colección. En comparación con los productos MODIS estándar altamente procesados, el flujo de datos de lectura directa inmediata será más ruidoso y requerirá de un procesamiento adicional basado en requerimientos específicos de cada aplicación.

Colecciones y fiabilidad

La fiabilidad del producto de IV varía en el espacio y el tiempo como resultado de variaciones geográficas y estacionales de la persistencia de nubes, nubes no detectadas, calidad de la estimación de la reflectancia de superficie, ángulos solares y de visión del sensor, integridad espectral a través de las bandas (rojo, infrarrojo cercano, azul), fondo del dosel (suelo, agua, nieve), topografía, y geolocalización (Miura, et al., 2002; Wolfe et al., 1998). Ha habido varias mejoras, conocidas como *Colecciones*, de los algoritmos científicos de MODIS, con el objeto de corregir problemas identificados en versiones previas y para caracterizar mejor las imperfecciones y fiabilidad del producto (ver Capítulo I). La Colección actual (5) de productos de IV está en la segunda etapa de validación, lo cual indica que su desempeño ha sido evaluado sobre un conjunto de sitios y períodos de tiempo ampliamente distribuidos con varios esfuerzos de validación in-situ (Morissette et al., 2002). El nivel más alto de validación, etapa 3, requiere una caracterización de la fiabilidad global del producto más completa, sistemática y estadísticamente robusta. MODIS tendrá una Colección 6 final lista en 2011 y una meta es tener el producto de IV en etapa 3 de validación.

Los IV MODIS Y LOS PROCESOS Y ESTADOS DE ECOSISTEMA

Los procesos ecosistémicos se refieren a eventos físicos, químicos y biológicos, que unen a organismos y su medio ambiente a través de ciclos de agua y ciclos biogeoquímicos, energía solar, y la fenología de especies y comunidades. Las variables biofísicas y bioquímicas del dosel relevantes para la caracterización de estados de vegetación incluyen la fracción de vegetación verde (Fv), índice de área foliar (LAI), la fracción de radiación activa fotosintética absorbida por la vegetación (fAPAR), el contenido de agua del dosel, y el contenido de clorofila, los cuales son todos parámetros importantes del ecosistema de interés para la comunidad de desarrolladores de modelos. Ejemplos de procesos del ecosistema que pueden ser analizados con datos de satélite, son la fotosíntesis y la transpiración de plantas, la producción y la descomposición brutas y netas, los ciclos del carbono y de los nutrientes, el enverdecimiento y desarrollo de hojas, senectud, la duración de la estación de crecimiento, la sucesión vegetal, y los cambios de uso y cubiertas del suelo. La evaluación de los procesos del ecosistema y sus respuestas temporales al cambio del medio ambiente se relacionan más adelante con las interacciones de luz, temperatura, nutrientes y humedad en el estado y condición de la vegetación.

Variables ecológicas biofísicas

Los datos de satélite ofrecen capacidades sin precedente para obtener detalles temporales y espaciales de propiedades del ecosistema en escalas locales a globales (Field et al., 1995). En contraste, sería muy difícil recolectar y procesar datos de campo confiables con suficiente cobertura temporal y espacial para su uso en análisis globales o regionales. Las numerosas aplicaciones de IV de satélite en estudios ecológicos han sido revisadas en Glenn (2008) y Kerr y Ostrovsky (2003).

Los IV no son cantidades físicas intrínsecas por sí mismas, sino que han sido relacionados empíricamente con varias propiedades ecológicas, obtenidas a partir de mediciones de campo y de modelos de transferencia radiativa del dosel (Cohen et al., 2003; Huemmrich, 2001). El valor de los IV espectrales medidos por satélite para la caracterización biofísica de ecosistemas está relacionada con (1) su habilidad para capturar fenómenos biofísicos esenciales con la fidelidad adecuada para estudios biogeoquímicos, hidrológicos, fenológicos y del clima; y (2) su extensión global en el tiempo y el espacio. Se ha encontrado que las relaciones del IV con cantidades biofísicas varían grandemente dependiendo de los varios ensam-

blajes estructurales de la cobertura del follaje, el área foliar y la concentración de clorofila típicamente encontrados en diferentes tipos de cobertura terrestre y etapas fenológicas. Como consecuencia, los estudios de satélite que relacionan los IV con cantidades biofísicas, encuentran con frecuencia correlaciones moderadas con variables específicas, son dependientes de la cobertura del terreno, y no pueden ser extrapolados fácilmente a estudios globales y regionales que involucran varios tipos de vegetación con estructuras de dosel y suelos diferentes.

La relación entre el NDVI y LAI ha sido estudiada extensamente con una asociación positiva para valores de LAI bajos entre 0 y 2, pero más débil en LAI superiores a 2 ó 3, valor después del cual el NDVI se satura (Baret y Guyot, 1991). Se han encontrado relaciones significativas, pero no lineales, entre el NDVI del satélite Landsat con los valores del LAI medidos en campo en sitios de bosque de coníferas en Siberia, sin embargo, se encontraron relaciones más pobres usando la resolución más gruesa de los NDVI de MODIS (Chen et al., 2005). En un bosque caduco de haya (*Fagus sylvatica*) en Europa, las relaciones NDVI-LAI variaron con los diferentes períodos de fenología, con las correlaciones más pobres ocurriendo en períodos de LAI máximo, como resultado de la saturación del NDVI (Wang et al., 2005). En campañas de validación de campo a menor escala a través de un amplio rango de biomas, Cohen et al. (2003) reportaron solamente correlaciones débiles entre el LAI medido en campo y varios productos MODIS incluyendo el IV.

Como el NDVI es más sensible a la banda del rojo, que tiene una profundidad de penetración óptica más baja en doseles, se satura muy rápidamente en áreas de alta biomasa. En contraste, el EVI es más sensible a la banda del infrarrojo cercano, y por lo tanto tiene una profundidad de penetración óptica mayor dentro de los doseles, permitiendo una sensibilidad extendida del EVI en áreas con LAI y biomasa más altos en las cuales el NDVI se satura (Fensholt et al., 2004). Houborg y Soegaard (2004) encontraron que los EVI de MODIS eran capaz de describir con exactitud la variación en biomasa verde de áreas agrícolas en Dinamarca, hasta a un LAI máximo de 5 ($r^2=0.91$). Así, los EVI pueden describir mejor las variaciones estructurales biofísicas del dosel y ser menos propensos a saturarse en áreas de biomasa alta con mayor LAI.

Se ha encontrado que los IV están correlacionados con la fracción de cubierta vegetal (F_v) con relaciones lineales y no lineales estadísticamente significativas (Carlson y Ripley, 1997). La fracción de vegetación verde es comúnmente derivada a través de combinaciones lineales simples de valores de IV altos (vegetación) y bajos (suelo) dentro de una imagen o de un tipo de bioma. Sin embargo,

Glenn et al. (2008) mostraron que diferentes especies de plantas dan diferentes relaciones IV-Fv ya que tienen diferentes valores de IV para una cobertura de 100%, debido a diferencias en el contenido de clorofila y en la arquitectura del dosel. Más aún, tales relaciones son también dependientes del sensor, por ejemplo, los valores del NDVI de AVHRR en vegetación densa son más bajos que aquellos de MODIS, debido a los anchos de bandas espectrales más angostos y a la corrección atmosférica más completa (aerosol, vapor de agua) en el producto NDVI de MODIS.

El contenido de clorofila al nivel del dosel es una propiedad clave de la comunidad de plantas y su evaluación con datos de satélite es relevante para estudios de productividad de ecosistema, flujos de CO₂, y estrés de vegetación (Gitelson et al., 2006). El contenido de clorofila a nivel de hoja ha sido inferido directamente usando índices hiperespectrales y modelos de simulación de dosel basados en hojas y plantas (Broge y Leblanc, 2001; Zarco-Tejada et al., 2004). Sin embargo, se ha notado en muchos estudios que otros factores tales como la arquitectura del dosel, la distribución de clorofila dentro del dosel, el LAI, y el suelo, complican la evaluación directa del contenido de clorofila del dosel, concluyendo que las relaciones del IV con el contenido de clorofila total del dosel tienden a ser curvilíneas debido a que las hojas de la superficie interceptan más luz que las hojas que están más abajo en el dosel (Gitelson et al., 2006).

La fracción de radiación activa fotosintética absorbida por la vegetación (fAPAR) en un dosel de vegetación es ampliamente usada en estudios de dinámicas de radiación y eficiencia en el uso de la luz para relacionar medidas satelitales de NDVI con productividad primaria y acumulación de biomasa,

$$fAPAR = APAR / PAR \quad (3)$$

donde APAR es la radiación activa fotosintética absorbida y PAR es la radiación activa fotosintética incidente, que cubre la radiación en la porción visible del espectro. Se ha mostrado en estudios de modelación y de campo que los NDVI están linealmente correlacionados con fAPAR, en varios tipos de bioma, y su integración sobre la estación de crecimiento ha sido correlacionada con la producción primaria neta del ecosistema (Asrar et al., 1984; Huemmrich et al., 2005).

Las relaciones lineales entre la fAPAR y el NDVI se han reportado en doseles con fondos de suelo más claros, sin embargo, tales relaciones se vuelven menos lineales en doseles con suelo subyacente más oscuro (Sellers, 1987; Gao et al.,

2000). En una campaña de validación MODIS en el Kalahari, proyecto conocido como SAFARI, se encontró que el fAPAR medido en el campo estaba fuertemente relacionado linealmente con el NDVI de MODIS, como se indica a continuación: $fAPAR = 0.88 * NDVI + 0.03$. Sin embargo, los coeficientes variaron claramente con el aumento de verdor estacional y en los periodos de sequía durante la estación de crecimiento, con declives en el multiplicador de NDVI, que se extienden de 0.96 a 0.44, respectivamente. En un estudio MODIS involucrando varios biomas en América del Norte, Sims et al. (2006) derivaron empíricamente la siguiente relación lineal entre el fAPAR "verde" y el NDVI lineal usando 16 especies diferentes: $fAPAR = 1.24 * NDVI - 0.168$.

Sin embargo, una proporción significativa (hasta el 40%) de la PAR incidente puede ser absorbida por los componentes no fotosintéticos de un dosel, tales como materia muerta o leñosa. Usando los datos MODIS y un modelo de transferencia radiativa acoplado de hojas de dosel (PROSAIL-2), Zhang et al. (2005) separaron el fAPAR en componentes de clorofila, hoja y dosel, y encontraron que los NDVI de MODIS se aproximaban mejor al fAPAR del dosel total, mientras que los EVI estaban más cercanamente acoplados con el fAPAR asociado a la clorofila.

Notaron que solo el fAPAR de la clorofila es usado para la fotosíntesis y es útil para cuantificar la producción primaria. Esto fue demostrado también por Xiao et al. (2004) con un análisis estacional de MODIS en bosques de coníferas y de latifoliadas, sugiriendo que los EVI pueden ser relacionados directamente al contenido de clorofila o al gradiente de verdor del dosel.

Procesos ecosistémicos

Aplicaciones recientes de los IV de MODIS han demostrado su utilidad en estudios del funcionamiento y de la estimaciones de la tasa de cambio en los procesos del ecosistema, tal como la producción primaria y la transpiración que dependen de la luz absorbida. Como se resume en Glenn et al. (2008), la falta de una correspondencia directa entre los IV y las propiedades biofísicas "individuales" del dosel, tales como el LAI o la fracción de vegetación verde (F_v), no afecta a la utilidad de los IV para predecir procesos biofísicos como la fotosíntesis y la transpiración. Tales procesos no están distribuidos de manera homogénea en el dosel, pero son dirigidos principalmente por la luz absorbida por las hojas (LAI) en la canopea, con atenuación significativa de la luz y los flujos en partes más bajas del dosel. Así, tanto la fotosíntesis y la transpiración, como las observaciones de sensor remoto, tienden

a estar más relacionadas con las interacciones de la radiación activa fotosintética incidente en el follaje en las capas superiores del dosel.

La producción primaria bruta (GPP) es el carbón fijado durante la fotosíntesis con unidades de masa de carbono fijado (del inglés *Gross Primary Productivity*) por unidad de superficie y por una unidad de tiempo dada (por ejemplo $\text{g-C m}^{-2} \text{d}^{-1}$). La GPP está relacionada con la cantidad de PAR absorbida por la vegetación verde multiplicada por la eficiencia con la cual la luz absorbida se usa en la fijación de carbono, o fotosíntesis (Monteith y Unsworth, 1990).

$$\text{GPP} = \text{LUE} * \text{APAR} = \text{LUE} * \text{fAPAR} * \text{PAR} \quad (4)$$

donde la producción primaria bruta (GPP) y APAR tienen las mismas unidades molares (por ejemplo, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y fAPAR se deriva a través de relaciones con el IV. Los valores de eficiencia de uso de la luz (LUE, del inglés *Light Use Efficiency*) pueden variar considerablemente dependiendo de los tipos de vegetación y en respuesta a factores ambientales tales como el agua, la temperatura y la luz. Muchos modelos de ecosistema estiman LUE_{max} usando tablas de consulta por tipos de vegetación y luego se ajustan estos valores hacia abajo, con base a factores de estrés del medio ambiente obtenidos de la información meteorológica disponible (Turner et al., 2006).

Rahman et al. (2005) sugirieron que en vez de pretender derivar LUE y estimar la fAPAR, un índice de grados de verdor obtenido por satélite puede usarse directamente para estimar la GPP. Estos autores analizaron datos para 10 torres de medición de flujos de CO_2 y H_2O (AmeriFlux) por el método de covarianza de torbellinos (Eddy Covariance, EC), en un amplio rango de tipos de bioma, y encontraron que los EVI de MODIS son capaces de estimar la GPP con una exactitud relativamente alta y sin la necesidad de estimación directa de LUE. Sims et al. (2006) notaron que la relación entre los flujos de GPP medidos por torres y los EVI de MODIS es más significativa en los bosques caducifolios y más baja para bosques siempreverdes. Sin embargo, los EVI fueron capaces de estimar la GPP con una exactitud relativamente alta en muchos sitios y sin consideración directa de LUE, simplificando así los modelos de balance de carbono sobre la mayoría de los tipos de vegetación. Se encontraron también relaciones lineales muy consistentes entre los EVI de MODIS y las mediciones de GPP realizadas en torres de flujos (EC) localizadas en bosques tropicales de alta biomasa en la Amazonia y el Sureste de Asia (Huete et al., 2008; Huete et al., 2006).

En contraste, los NDVI de MODIS se saturan en estos bosques densos y no muestran ninguna característica estacional, a pesar de los grandes cambios estacionales de la GPP. El EVI puede proveer una relación más directa con la fotosíntesis que el NDVI en bosques amazónicos de LAI altos al basarse en las reflectancias de dosel en el infrarrojo cercano que son más sensibles y menos propensas a saturarse. Esta conclusión está sustentada por los análisis teóricos que muestran que los índices espectrales que son más funcionales en el infrarrojo cercano describen mejor las capacidades fotosintéticas de dosel promediadas por área y la productividad primaria bruta (Sellers, 1987). La saturación y una sobreestimación de la GPP, particularmente después del pico de la estación de crecimiento, fueron también un problema con el NDVI de MODIS en la zona de estudio de Sky Oaks en California donde predomina el chaparral (Cheng et al., 2006).

La alta correlación estacional del EVI de MODIS con la GPP medida por torre de flujos de CO₂/H₂O permitió a Ichii et al. (2007) limitar el modelo de ecosistema terrestre BIOMA-BGC (Ciclos Biogeoquímicos) y mapear con éxito la variabilidad espacial de las profundidades de raíz de árboles en la Amazonia, mejorando las evaluaciones de carbono, agua y ciclos de energía en bosques tropicales. Potter et al. (2007) usaron los EVI de MODIS en el modelo de NASA-CASA (Enfoque Carnegie Ames Stanford) y encontraron que los resultados del modelo permitían la predicción de las tasas de captación de CO₂ en el pico de la estación de crecimiento en cultivos de riego y en bosques templados húmedos. Yang et al. (2007) desarrollaron una medición a escala continental de la producción primaria bruta integrando datos de EVI-MODIS y AmeriFlux usando una técnica automatizada inductiva de aprendizaje que se llama máquinas de vectores de apoyo (SVM).

Los datos de EVI-MODIS han sido también incorporados al Modelo de Vegetación de Fotosíntesis (VPM, Xiao et al., 2004) y en el Modelo de Respiración y Fotosíntesis (VPRM, Mahadevan, 2008) para producir predicciones calibradas con torre de flujo de productividad primaria bruta, intercambio de ecosistema bruto, e intercambio de ecosistema neto en una serie de biomas, incluyendo sitios de bosque siempreverde y caducifolio en Norte América templada y en bosque sempervirente tropical temporalmente húmedo en la Amazonia (Xiao et al., 2005),

$$GPP = (LUE_{max} \cdot T \cdot W \cdot P) \times fAPAR \times PAR \quad (5)$$

donde fAPAR es derivado de EVI y el valor máximo de LUE (LUE_{max}) se reduce por escalares de temperatura (T), humedad (W) y fenología (P). En

ambos modelos de VPM y VPRM , el Índice de Agua de la Superficie Terrestre (LSWI) se usa para incorporar cambios de estado en el dosel y en la humedad del suelo.

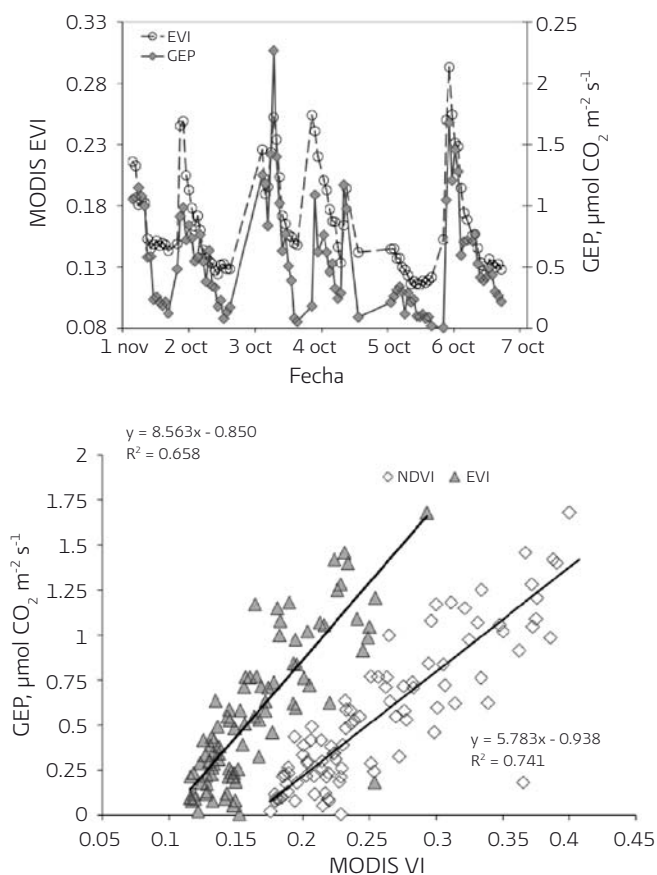
Para examinar cómo se ajustan los IV de estacionales a las medidas de flujo de torre, descargamos datos de IV de MODIS y de flujo de la torre FLUXNET de La Paz, Baja California (<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet>). Este sitio presenta una vegetación escasa y se localiza en una región subtropical árida, donde la precipitación anual está por debajo de los 200 mm, ocurriendo la mayor parte de las precipitaciones durante el verano (Hastings et al., 2005). Hay una correspondencia estacional e interanual entre las mediciones de los IV de MODIS y de producción bruta de ecosistema (GEP) medidos por la torre, siendo el 2006 un año de sequía especialmente pronunciada con baja productividad e IV, hasta el periodo invernal de mayor productividad al principio de 2007 (Figura 9a). Las medidas de grados de verdor de satélite representaron el 74% (NDVI) y el 66% (EVI) de la varianza de la GEP medida por la torre (Figura 9b).

Las mediciones combinadas de sensor remoto y de torre de flujo in situ también han arrojado relaciones estrechas con flujos de agua (Glenn et al., 2007). Las mediciones de evapo-transpiración (ET) de estación de torre de flujo localizadas en comunidades semiáridas de pasto de tierras altas, de matorrales y comunidades ribereñas en Arizona y Nuevo México estuvieron fuertemente correlacionadas con los EVI de MODIS ($r = 0.80 - 0.94$) (Nagler et al., 2005). En el sitio de estudio de La Paz, los IV-MODIS siguen bastante bien las variaciones estacionales e interanuales de la evapo-transpiración medida por torre, contando con 66% (EVI) y 57% (NDVI) de la varianza de las mediciones (Figura 10).

Yang et al. (2006) estimaron la ET a escala continental a través de la combinación de datos MODIS con mediciones realizadas en torres de flujo (EC) usando un modelo SVM. Los EVI-MODIS mostraron ser el factor explicativo más importante con estimaciones de ET bastante exactas (error medio cuadrático de 0.62 mm d^{-1}). Los perfiles estacionales de IV tienden a seguir la ET medida por torre bastante bien cuando la transpiración, T , domina los flujos de agua, lo cual es común tanto en áreas ribereñas como en los periodos entre tormentas en sitios de tierra alta. Los valores de IV derivados de satélite no podrían monitorear la contribución del componente de evaporación del suelo al total del ET de dosel después de eventos de precipitación.

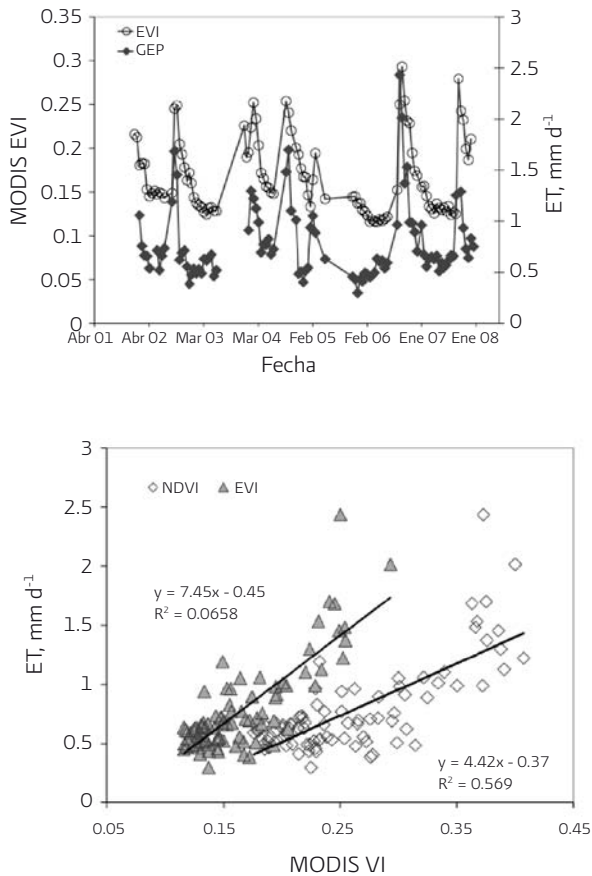
La alta correlación entre IV y flujos medidos por torre en tantos ecosistemas diferentes puede parecer sorprendente porque, en teoría, los intercambios de CO_2

FIGURA 9. COMPARACIONES ESTACIONALES ENTRE DATOS EVI-MODIS Y MEDICIONES DE LA GEP POR TORRE DE FLUJO EN EL SITIO DE LA PAZ (A) Y RELACIÓN LINEAR ENTRE LAS MEDICIONES DE LA GEP CON TORRE Y LOS ÍNDICES NDVI Y EVI DE MODIS (B)



y agua están controlados en parte por la resistencia estomatal y relacionados no solo con las propiedades del dosel sino también con variables ambientales (PAR, humedad del suelo, temperatura del aire, déficit de presión de vapor, viento), los cuales pueden variar considerablemente en lapsos de tiempo cortos. Sin embargo, como ha sido revisado por Glenn et al. (2008), los procesos ecológicos tienden a ajustar características de las plantas (por ej. densidad de follaje) a lo largo de periodos de semanas o meses, para ajustarse a la capacidad ambiental de realizar la

FIGURA 10. COMPARACIONES ESTACIONALES ENTRE DATOS EVI-MODIS Y MEDICIONES DE LA ET POR TORRE DE FLUJO EN EL SITIO DE LA PAZ (A) Y RELACIÓN LINEAR ENTRE LAS MEDICIONES DE LA ET CON TORRE Y LOS ÍNDICES NDVI Y EVI DE MODIS (B).



fotosíntesis y maximizar el crecimiento. Esto se conoce como la teoría de balance o de optimización de los recursos (Field et al., 1995), que trata la fotosíntesis o la producción primaria como integradores de la disponibilidad de recursos. Es costoso producir y mantener hojas, de tal modo que cuando las plantas sufren estrés de agua o nutrientes, o están expuestos a condiciones no favorables, reducen su área de hojas para usar los recursos más eficientemente.

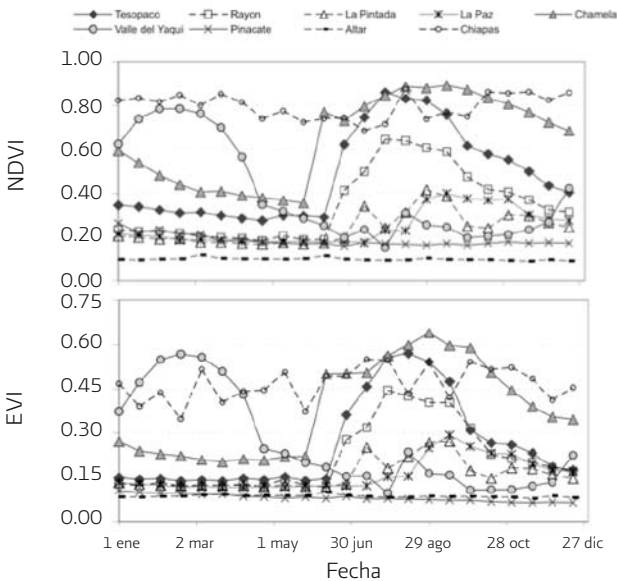
MODIS tiene también productos de LAI y fAPAR de niveles más altos y productos de modelo de ecosistemas, que incorporan información meteorológica, para derivar estimaciones de GPP, NPP, y ET (Cleugh et al., 2007; Turner et al., 2006).

Dinámicas de la vegetación y estacionalidad

Los datos de satélite son extremadamente útiles al proveer observaciones certeras y repetitivas de la condición y la actividad de la vegetación a lo largo de una estación de crecimiento, y para describir las distribuciones espaciales y las variaciones interanuales de la estacionalidad del paisaje. Ejemplos de perfiles estacionales de IV-MODIS para una gama de sitios de estudio (Tabla 4) y tipos de cubierta de suelo de desiertos hiperáridos a bosques tropicales en México se muestran en la Figura 11.

En total, los valores del NDVI de MODIS variaron entre 0.10 y 0.90, y los valores del EVI entre 0.07 y ~0.65, con variaciones estacionales del IV para el mismo

FIGURA 11. PERFILES ESTACIONALES DE NDVI Y EVI-MODIS EN 2006 EN LAS 9 ÁREAS DE ESTUDIO



tipo de cubierta del suelo de la misma magnitud que las variaciones espaciales de IV entre todos los diferentes tipos de cubierta de suelo. Los NDVI mostraron una gama más amplia de valores en superficies con escasa o ninguna cubierta de vegetación verde, reduciendo esencialmente la gama "efectiva" de valores de NDVI. Los EVI mostraron una gama más estrecha de valores a 0.07 ± 0.02 para las superficies hiper áridas. Los valores del IV de desierto son muy estables, sugiriendo que las bandas MODIS calibradas radiométricamente no muestran efectos de envejecimiento o degradación a lo largo de ocho años de mediciones.

La mayoría de los perfiles estacionales siguen la estacionalidad de las precipitaciones, con excepción del sitio de agricultura de riego en el valle de Yaqui, donde más de 50 % del área está sembrado con trigo de invierno desde noviembre hasta abril (Lobell y Asner, 2004). Los tipos de cubiertas forestales presentaron los valores de IV-MODIS más altos, con los valores más elevados ocurriendo en el bosque estacional tropical seco caducifolio de hoja ancha, presente en la estación biológica de Chamela. La zona de estudio de bosque tropical húmedo de hoja ancha en Chiapas mostró poca estacionalidad con altos valores de IV a lo largo de todo el año. Esta zona tuvo también una de las más grandes variaciones debido al ruido secundario, relacionada con las dificultades para adquirir píxeles de buena calidad en ambientes tan nubosos (contaminación de nubes). El bosque tropical deciduo de Tesopaco, ubicado en las faldas del oeste de la Sierra Madre Occidental, presentó importantes contrastes estacionales con un desarrollo muy rápido de las hojas empezando al principio de los monzones (Watts et al., 2007). La zona de matorrales subtropicales en elevaciones más bajas (Rayón, Sonora) presentó también un enverdecimiento notable con los comienzos de las lluvias, pero con una amplitud más baja. El sitio de matorrales desérticos con pasto Salinas (*Cenchrus ciliaris*), en La Pintada, Sonora, mostró un contraste estacional más bajo y una producción general baja (Watts et al., 2007).

Fenología

La fenología se refiere a la distribución temporal de eventos biológicos recurrentes y es un parámetro importante para la cuantificación de las respuestas de los ecosistemas a la variabilidad del clima y para insertar procesos terrestres dentro de modelos climáticos globales y regionales. Los IV son ampliamente usados para caracterizar diferentes fenofases de la vegetación, tales como la aparición de nuevas hojas, marchitamiento, defoliación, y dormancia, que son críticos para comprender

el funcionamiento de los ecosistemas y los patrones estacionales asociados al carbono, al agua, y a los flujos de energía (Zhang et al., 2003).

Evrendilek y Gulbeyaz (2008) mostraron el interés de las series temporales de los NDVI/ EVI de MODIS para monitorear las dinámicas estacionales de 16 tipos de ecosistemas (desde el desértico hasta el boreal y el alpino) en Turquía. Los IV-MODIS fueron también altamente útiles para caracterizar los patrones fenológicos y evaluar la cubierta de copa de plantas leñosas a lo largo de un gradiente de clases fisonómicas de vegetación en el bioma del *cerrado* brasileño (Ratana et al., 2005). Kawamura et al. (2005) monitorearon cambios fenológicos a corto plazo en condiciones de forraje de pastizal con EVI-MODIS en la estepa semiárida de Xilingol en Mongolia Interior. Derivaron métricas fenológicas de biomasa viva y de concentración de proteína cruda en pie, las cuales son útiles para brindar a los administradores de tierras información basada en valores nutritivos para la planificación temporal del corte del pasto. Se desarrolló un algoritmo de 3 índices, basado en los NDVI y EVI de MODIS, y el Índice de Agua de la Superficie Terrestre (LSWI) para generar información geoespacial oportuna y actualizada sobre los patrones fenológicos de crecimiento en campos de arroz y la detección de periodos de inundación con el fin de mapear las distribuciones de arroz para la irrigación, la seguridad alimentaria, las estimaciones de emisión de gases, y la evaluación del riesgo de gripe aviar en el Sur y Sureste Asiático (Xiao et al., 2006).

La sensibilidad extendida de EVI-MODIS ha facilitado muchos estudios fenológicos en bosques densos tropicales lluviosos. Usando MODIS de 250 m y EVI-CMG, Huete et al. (2006) lograron detectar variaciones fenológicas de verdor, atribuidas a la pérdida y al cambio de hojas, en vegetación densa de bosques tropicales lluviosos amazónicos. Encontraron que los bosques lluviosos se ponen hasta un 25 % más verde en la estación seca en respuesta a la disponibilidad de luz solar, un descubrimiento que fue confirmado por mediciones de la GPP acopladas y calibradas con torre de flujo. Las áreas de bosque deforestadas, por el otro lado, mostraron reducciones del EVI durante la estación seca, presumiblemente porque la vegetación de raíz más corta no tenía acceso al agua del suelo profundo.

El producto estándar MODIS de fenología vegetativa (MOD12Q2) usa las inflexiones máximas en perfiles de EVI derivados de NBAR para producir un conjunto global de métricas fenológicas basado en fechas clave de transición relacionadas con la actividad del crecimiento vegetativo (Zhang et al., 2003). Los EVI-NBAR han sido aplicados exitosamente para mapear la fenología de patrones de cosechas de arroz únicas, dobles y triples en el delta de Mekong donde anteriormente esto

solo fue logrado con datos SAR (Sakamoto et al., 2007). Los EVI-NBAR también fueron implementados para mostrar el efecto de los climas urbanos sobre fechas de transición de fenología vegetativa en ciudades norte-americanas (Zhang et al., 2004). Se encontraron efectos fuertes de isla de calor en áreas urbanas con incrementos de ~15 días en la estación de crecimiento y retrasos en el principio de la dormancia, en comparación con ecosistemas adyacentes no perturbados, un patrón que decae exponencialmente con la distancia a las áreas urbanas.

Mediciones fenológicas basadas en satélites involucran compromisos y sinergias entre diversos sistemas de sensor. Datos de satélite de resolución moderada, tales como MODIS, proveen mediciones de alta frecuencia temporal (diario) pero de resolución espacial baja (250 m – 1 km). Esto es útil para derivar información estacional de la vegetación al nivel de comunidad, concentrando una o más especies de plantas con diferentes fenologías. Se necesitarían datos espaciales de satélite con resoluciones más finas (Quickbird/ IKONOS a ~1- 4m or ASTER/ Landsat/Hyperion a 15m-30m) para estudiar comunidades vegetales más complejas, pero tales datos son más costosos y solo disponibles con frecuencias temporales mucho más bajas (16 días – 1 mes).

Las reflectancias de superficie diarias de MODIS podrían ofrecer una resolución temporal más idónea para el monitoreo de la vegetación en tiempo real, de eventos fenológicos detallados y más sutiles. Sin embargo, los datos diarios son adquiridos con geometrías sol-superficie-sensor variables y exigen un esfuerzo cuidadoso para eliminar las influencias de señales extrañas. Existen diversos algoritmos disponibles basados en series temporales, incluyendo Timesat, análisis de Fourier y análisis armónicos (Jönsson and Eklundh, 2004), para minimizar variaciones de frecuencias más altas, pero tienen también el potencial de eliminar o distorsionar eventos fenológicos y dinámicas estacionales de la vegetación más débiles pero importantes.

CONCLUSIONES

En éste capítulo hemos destacado algunos de los usos y avances más importantes de la percepción remota de las cubiertas terrestres basada en datos MODIS para el monitoreo y el estudio de los ecosistemas, con un énfasis particular en los índices de vegetación. La densidad y dinámicas del follaje verde derivados de las series temporales de IV son herramientas poderosas para la medición del estado fisiológico de la vegetación. Se mostró que los IV son herramientas de gran valor para

el monitoreo de procesos de ecosistemas relacionados con la luz adsorbida por la vegetación activa (verde), en particular, procesos relacionados con la fotosíntesis de dosel (producción primaria bruta y neta, fenología, enverdecimiento y marchitamiento) y procesos relacionados con la transpiración de las plantas.

El uso combinado de mediciones de flujos de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ por torres (EC) y de percepción remota mostró el poder de la integración de datos de sensores remotos y de datos de campo. Se podría cuestionar la generalidad de estudios locales, basados en una sola torre, y observaciones inesperadas del sensor remoto podrían ser generadas por artefactos (debidos, por ejemplo, a un patrón estacional de interferencia inducido por la cobertura de nube, los aerosoles, o el ángulo solar), pero la consistencia entre las observaciones independientes de IV y de flujo medido por torre, resta fuerza a estos dos cuestionamientos. El trabajo futuro está enfocado más en usar los IV directamente en la estimación de flujos de carbono y humedad, que en determinar los atributos del estado del dosel que son difíciles de medir.

Los IV-MODIS se incorporan también rutinariamente en un rango amplio de aplicaciones abarcando el manejo de recursos, especies invasivas, eficiencia agrícola, manejo de carbono y agua, manejo de desastres y salud pública. Los datos de IV-MODIS han sido usados para el monitoreo operacional de la deforestación en la Amazonia (Ferreira et al., 2007), el monitoreo de la biodiversidad y de especies invasivas, incluyendo pasto Buffel (*Cenchrus cilliris*) (Franklin et al., 2006), monitoreo de plaga de langosta (Zha et al., 2005), y herramientas interactivas de monitoreo para Sistemas de Alerta Temprana de Hambrunas (FEWS) (USAID, <http://www.fews.net>). Las imágenes de series temporales de IV-MODIS se usan también para fines epidemiológicos (enfermedades infecciosas y transmitidas por vector) para responder a muchos problemas de salud relacionados con el medio ambiente, a través de la visualización de regiones que son, o bien más verdes (más húmedas) que el promedio o menos verde (más secas) de lo normal, para ayudar a evaluar brotes de malaria, fiebre del Valle del Rift y otras enfermedades causadas por mosquitos (Beck et al., 2000).

REFERENCIAS

- Asrar, G., M. Fuchs, E.T. Kanemasu, and S.L. Hatfield. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, *Agronomy Journal*, 76:300-306.
- Baret, F., and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, 35:161-173.

- Beck, L.R., B.M. Lobitz, and B.L. Wood. 2000. Remote Sensing and Human Health: New Sensors and New Opportunities. *Emerging Infectious Diseases*, 6:217.
- Broge, N.H., and E. Leblanc. 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76:156-172.
- Carlson, T.N., and D.A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62:241-252.
- Chen, X., L. Vierling, D. Deering, and A. Conley. 2005. Monitoring boreal forest leaf area index across a Siberian burn chronosequence: a MODIS validation study. *International Journal of Remote Sensing*, 26:5433-5451.
- Cheng, Y., J.A. Gamon, D.A. Fuentes, Z. Mao, D.A. Sims, H.-I. Qiu, H. Claudio, A. Huete, and A.F. Rahman. 2006. A multi-scale analysis of dynamic optical signals in a Southern California chaparral ecosystem: A comparison of field, AVIRIS and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 103:369-378.
- Chuvieco, E., G. Ventura, M.P. Martín, and I. Gomez. 2005. Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*, 94:450 – 462.
- Cleugh, H.A., R. Leuning, Q. Mu, and S.W. Running. 2007. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 106:285-304.
- Cohen, W.B., T.K. Maieringer, Z. Yang, S.T. Gower, D.P. Turner, W.D. Ritts, M. Bertetche, and S.W. Running. 2003. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: a quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, 88:233-255.
- Evrendilek F. and O. Gulbeyaz. 2008. Deriving vegetation dynamics of natural terrestrial ecosystems from MODIS NDVI/EVI data over Turkey. *Sensors*, 8(9): 5270-5302.
- Fensholt, R., I. Sandholt, and M.S. Rasmussen. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91:490-507.
- Ferreira, N.C., L.G. Ferreira, A.R. Huete, and M.E. Ferreira. 2007. An operational deforestation mapping system using MODIS data and spatial context analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 28:47 - 62.
- Field, C.B., J.T. Randerson, and C.M. Malmström. 1995. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51:74-88.

- Franklin, K.A., K. Lyons, P.L. Nagler, D. Lampkin, E.P. Glenn, F. Molina-Freaner, T. Markow, and A.R. Huete. 2006. Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) land conversion and productivity in the plains of Sonora, Mexico. *Biological Conservation*, 127:62-71.
- Gao, X., A.R. Huete, W. Ni, and T. Miura. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment*, 74:609-620.
- Gitelson, A.A., A. Viña, S. B. Verma, D. C. Rundquist, T. J. Arkebauer, G. Keydan, B. Leavitt, V. Ciganda, G. G. Burba, and A. E. Suyker. 2006. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *J. Geophys. Res.*, 111:D08S11, doi:10.1029/2005JD006017.
- Glenn, E.P., A.R. Huete, P.L. Nagler, K.K. Hirschboeck, and P. Brown. 2007. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26:139-168.
- Glenn, E.P., Huete, A.R., Nagler, P.L., Nelson, S.G. 2008. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape, *Sensors*, 8:2136-2160.
- Gobron, N., B. Pinty, M.M. Verstraete, and J.L. Widlowski. 2000. Advanced vegetation indices optimized for up-coming sensors: Design, performance, and applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38:2489-2505.
- Gutman, G.G. 1994. Global data on land surface parameters from NOAA-AVHRR for use in numerical climate model. *Journal of Climate*, 7:669-680.
- Hastings, S.J., Walter C. Oechel Arturo Muhlia-Melo. 2005. Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub community (*Sarcocaulis*) in Baja California, Mexico. *Global Change Biology*, 11:927-939.
- Houborg, R.M., and H. Soegaard. 2004. Regional simulation of ecosystem CO₂ and water vapor exchange for agricultural land using NOAA AVHRR and Terra MODIS satellite data. Application to Zealand, Denmark. *Remote Sensing of Environment*, 93:150-167.
- Huemmerich, K.F., J.L. Privette, M. Mukelabai, R.B. Myneni, and Y. Knyazikhin. 2005. Time-series validation of MODIS land biophysical products in a Kalahari woodland, Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 26:4381 - 4398.
- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E.P. Rodriguez, X. Gao, and L.G. Ferreira. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83:195-213.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25:295-309.

- Huete, A.R., N. Restrepo-Coupe, P. Ratana, K. Didan, S.R. Saleska, K. Ichii, S. Panuthai, and M. Gamo. 2008. Multiple site tower flux and remote sensing comparisons of tropical forest dynamics in Monsoon Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148:748-760.
- Huete, A.R., K. Didan, Y. E. Shimabukuro, P. Ratana, S. R. Saleska, L. R. Hutyrá, W. Yang, R. R. Nemani, and R. Myneni. 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 33, L06405, doi:10.1029/2005GL025583.
- Ichii, K., Hashimoto, H., White, M.A., Potter, C., Hutyrá, L.R., Huete, A.R., Myneni, R.B., Nemani, R.R. 2007. Constraining rooting depths in tropical rainforests using satellite data and ecosystem modeling for accurate simulation of gross primary production seasonality. *Global Change Biology*, 13:67-77.
- Jönsson, P., and L. Eklundh. 2004. TIMESAT--a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30:833-845.
- Kaufman, Y., and D. Tanré. 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30:261-270.
- Kawamura, K., T. Akiyama, H. Yokota, M. Tsutsumi, T. Yasuda, O. Watanabe, G. Wang, and S. Wang. 2005. Monitoring of forage conditions with MODIS imagery in the Xilingol steppe, Inner Mongolia. *International Journal of Remote Sensing*, 26:1423 - 1436.
- Kerr, J.T., and M. Ostrovsky. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, 18:299-305.
- Lobell, D.B., and G.P. Asner. 2004. Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 93:412-422.
- Los, S.O., P.R.J. North, W.M.F. Grey, and M.J. Barnsley. 2005. A method to convert AVHRR Normalized Difference Vegetation Index time series to a standard viewing and illumination geometry. *Remote Sensing of Environment*, 99:400-411.
- Mahadevan, P., S. C. Wofsy, D. M. Matross, X. Xiao, A. L. Dunn, J. C. Lin, C. Gerbig, J. W. Munger, V. Y. Chow, and E. W. Gottlieb 2008. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM). *Global Biogeochem. Cycles*, 22:GB2005, doi:10.1029/2006GB002735.
- Miura, T., A.R. Huete, and H. Yoshioka. 2000. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38:1399-1409.
- Monteith, J.L., and M.H. Unsworth. 1990. *Principles of Environmental Physics*. 2 ed. Arnold, London.
- Morisette, J.T., J.L. Privette, and C.O. Justice. 2002. A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing of Environment*, 83:77-96.

- Myneni, R.B., C.D. Keeling, C.J. Tucker, G. Asrar, and R.R. Nemani. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386:698-702.
- Nagler, P.L., J. Cleverly, E. Glenn, D. Lampkin, A. Huete, and Z. Wan. 2005. Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 94:17-30.
- Potter, C., S. Klooster, A. Huete, and V. Genovese. 2007. Terrestrial carbon sinks for the United States predicted from MODIS satellite data and ecosystem modeling. *Earth Interactions*, 11:1-21.
- Rahman, A., Sims, D., Cordova, V., El-Masri, B. . 2005. Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes. *Geophysical Research Letters*, 32:10.1029/2005GL024127.
- Ratana, P., A.R. Huete, and L. Ferreira. 2005. Analysis of cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal -temporal domain. *Earth Interactions*, 9:1-22.
- Running, S.W., D.D. Baldocchi, D.P. Turner, S.T. Gower, P.S. Bakwin, and K.A. Hibbard. 1999. A Global Terrestrial Monitoring Network Integrating Tower Fluxes, Flask Sampling, Ecosystem Modeling and EOS Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 70:108-127.
- Sakamoto, T., N. Van Nguyen, A. Kotera, H. Ohno, N. Ishitsuka, and M. Yokozawa. 2007. Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery. *Remote Sensing of Environment*, 109:295-313.
- Schaaf, C.B., F. Gao, A.H. Strahler, W. Lucht, X. Li, T. Tsang, N.C. Strugnell, X. Zhang, Y. Jin, J.-P. Muller, P. Lewis, M. Barnsley, P. Hobson, M. Disney, G. Roberts, M. Dunderdale, C. Doll, R.P. d'Entremont, B. Hug, S. Liang, J.L. Privette, and D. Roy. 2002. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1-2:135-148.
- Sellers, P.J. 1987. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration: II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sensing of Environment*, 21:143-183.
- Sims, D.A., Rahman, A.F., Cordova, V.D., El-Masri, B.Z., Baldocchi, D.D., Flanagan, L.B., Goldstein, A.H., Hollinger, D.Y., Misson, L., Monson, R.K., Oechel, W.C., Schmid, H.P., Wofsy, S.C., Xu, L. 2006. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. *Journal of Geophysical Research*, 111:G04015.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8:127-150.
- Tucker, C.J., H.E. Dregne, and W.W. Newcomb. 1991. Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. *Science*, 253:299-301.

- Turner, D.P., W.D. Ritts, W.B. Cohen, S.T. Gower, S.W. Running, M. Zhao, M.H. Costa, A.A. Kirschbaum, J.M. Ham, S.R. Saleska, and D.E. Ahl. 2006. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102:282-292.
- Wang, Q., S. Adiku, J. Tenhunen, and A. Granier. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94:244-255.
- Watts, C.J., R.L. Scott, J. Garatuza-Payan, J.C. Rodriguez, J.H. Prueger, W.P. Kustas, and M. Douglas. 2007. Changes in Vegetation Condition and Surface Fluxes during NAME 2004. *Journal of Climate*, 20:1810-1820.
- Wolfe, R.E., D.P. Roy, and E. Vermote. 1998. MODIS Land Data Storage, Gridding, and Compositing Methodology: Level 2 Grid. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36:1324-1338.
- Xiao, X., S. Boles, S. Frolking, C. Li, J.Y. Babu, W. Salas, and B. Moore III. 2006. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 100:95-113.
- Xiao, X., Q. Zhang, B. Braswell, S. Urbanski, S. Boles, S.C. Wofsy, B. Moore III, and D. Ojima. 2004. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 91:256-270.
- Xiao, X., Q. Zhang, S. Saleska, L. Hutyrá, P. De Camargo, S. Wofsy, S. Frolking, S. Boles, M. Keller, and B. Moore III. 2005. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 94:105.
- Yang, F., M.A. White, A.R. Michaelis, K. Ichii, H. Hashimoto, P. Votava, A.X. Zhu, and R.R. Nemani. 2006. Prediction of Continental-Scale Evapotranspiration by Combining MODIS and AmeriFlux Data Through Support Vector Machine. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44:3452-3461.
- Yang, F., K. Ichii, M.A. White, H. Hashimoto, A.R. Michaelis, P. Votava, A.X. Zhu, A. Huete, S.W. Running, and R.R. Nemani. 2007. Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach. *Remote Sensing of Environment*, 110:109-122.
- Zarco-Tejada, P., J.R. Miller, A. Morales, A. Berjón, and J. Agüera. 2004. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing of Environment*, 90:463-476.
- Zha, Y., J. Gao, S. Ni, and N. Shen. 2005. Temporal filtering of successive MODIS data in monitoring a locust outbreak. *International Journal of Remote Sensing*, 26:5665 - 5674.

- Zhang, Q., X. Xiao, B. Braswell, E. Linder, F. Baret, and B. Moore III. 2005. Estimating light absorption by chlorophyll, leaf and canopy in a deciduous broadleaf forest using MODIS data and a radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 99:357-371.
- Zhang, X., M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hodges, F. Gao, B.C. Reed, and A. Huete. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84:471-475.
- Zhang, X., M. A. Friedl, C. B. Schaaf, A. H. Strahler, A. Schneider 2004. The footprint of urban climates on vegetation phenology *Geophysical Research Letters*, 31:L12209.

CAPÍTULO 9

Evaluación de métodos y productos derivados del sensor MODIS para la cartografía de la cubierta del suelo en México

Tzitziki Janik García-Mora, Jean-François Mas

RESUMEN

Las imágenes derivadas de sensores como MODIS representan una alternativa para mapear y monitorear las cubiertas del suelo sin que hasta el momento se cuente con datos precisos de su fiabilidad a nivel regional utilizando diferentes enfoques de análisis. Este trabajo pretende contribuir al conocimiento sobre el tipo de datos y métodos más idóneos para generar información de cubierta de suelo. Con este objetivo, se eligieron tres áreas de estudio que representan a los tipos de vegetación más comunes en México. Se evaluaron diferentes tipos de datos MODIS (índices de vegetación, compuestos espectrales de 8 días e imágenes de reflectancia diarias) por medio de dos enfoques de clasificación: el método de máxima verosimilitud y las redes neuronales. A cada clasificación se le incorporaron dos tipos de datos auxiliares para complementar la información espectral. Los resultados muestran que es posible obtener mapas confiables a partir de estos datos de baja resolución si se consideran categorías generales.

INTRODUCCIÓN

Es indispensable contar con datos actualizados sobre el uso y la cubierta del suelo para monitorear y entender los procesos de cambio como la deforestación o la degradación forestal, desarrollar políticas de gestión de los recursos naturales y

proveer información para modelos prospectivos del cambio climático y sus impactos. Desde la década de 1980 la percepción remota ha jugado un papel esencial en el monitoreo de las cubiertas terrestres (Millington y Alexander, 2000). Para estudios locales o regionales se emplearon ampliamente sensores de mediana resolución espacial (resolución espacial de unas decenas de metros) como Landsat o SPOT. Para estudios de áreas extensas se requiere una gran cantidad de imágenes, lo cual vuelve el procesamiento de estos datos largo y costoso. Por ejemplo, se necesitan más de 120 imágenes Landsat y más de 600 imágenes SPOT para cubrir el territorio nacional, y el mapeo con base en estas imágenes requiere de una cantidad importante de tiempo y de personal especializado (Mas et al., 2002; Palacio et al., 2000).

Este trabajo pretende contribuir a conocer la efectividad de los datos de baja resolución espacial derivados del sensor MODIS bajo diferentes métodos de análisis en el mapeo de las cubiertas del suelo y evaluar el nivel de discriminación alcanzable, manteniendo una fiabilidad aceptable, en tres regiones de México.

ÁREAS DE ESTUDIO

Se eligieron tres áreas representativas de los tipos de vegetación de mayor superficie en México (región del Tancítaro, Michoacán; Mazatán, Sonora y centro de Quintana Roo). Las tres zonas cuentan también con distintos grados de manejo y conservación. De acuerdo con INEGI, Michoacán se encuentra dentro de los estados con más cambios en la cubierta vegetal, con menos de 35% de la vegetación original. El área de Mazatán, Sonora, cuenta con un grado de perturbación moderado, mientras que el área maya es uno de las regiones más conservadas del país.

Se eligió un área de 4,650 km², circundante al cerro del Tancítaro, en la región centro-oriental de México, que llamaremos región del Tancítaro (Figura 1). Esta encierra áreas que corresponden a dos provincias fisiográficas del país, la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico Transversal. Cuenta con un amplio rango altitudinal (600 a 4000 m), los climas representados son templado-húmedo, semicálido subhúmedo, semicálido húmedo hasta cálido subhúmedo. La temperatura media anual varía desde los 10°C en el pico de la montaña del Tancítaro hasta los 24°C en las partes bajas mientras que la precipitación media oscila entre los 1000 a los 1500 mm. La cubierta vegetal incluye selva baja caducifolia, bosque de pino y de pino-encino además de extensas áreas de agricultura de temporal, agricultura

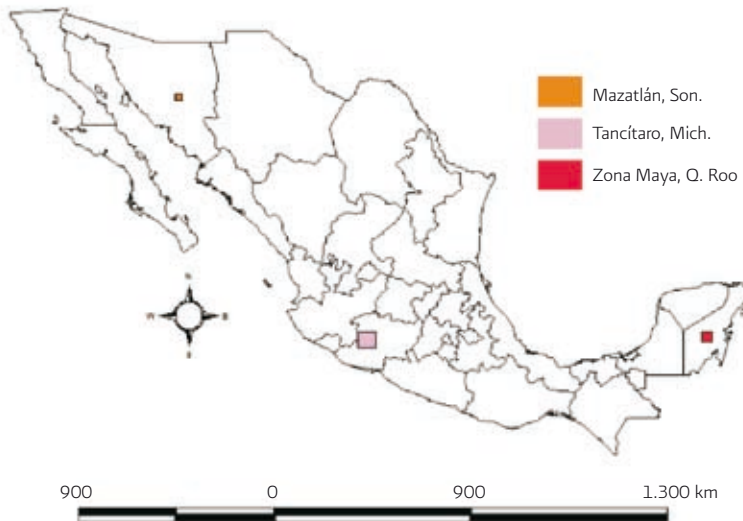
de riego, pastizales y huertas de aguacate. Se encuentra también un área sin vegetación (colada de lava del volcán Parícutín) y ciudades como Uruapan (279,229 habitantes) y Apatzingán (114,837 habitantes).

El área de Mazatlán cuenta con una extensión de 892 km², se encuentra ubicada al noroeste del país en el estado de Sonora (figura 1), en la provincia fisiográfica denominada llanura sonorense, y específicamente en la subprovincia sierras y llanuras sonorenses.

El rango altitudinal va desde los 450 m en las zonas bajas hasta los 1,550 m en la parte más alta del cerro "Los buzones", con climas que varían de semiseco templado a seco semicálido, y temperaturas que oscilan de los 18°C a los 22°C, presentando una precipitación media anual de 400 a 500 mm por año. El tipo de vegetación predominante es el matorral subtropical y el mezquital, en la zona de la montaña se encuentra una porción de bosque de encino, y hay también algunos pastizales y agricultura de riego. Dentro del área se encuentran pequeños poblados de los cuales el de mayor extensión es Mazatlán con 1,743 habitantes.

La región central de Quintana Roo se localiza al sureste de México (Figura 1), abarca una extensión de 3,600 km², se encuentra sobre una planicie de origen tectónico, el relieve es prácticamente plano con algunas colinas de tamaño pequeño

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO



y numerosas hondonadas; la altitud promedio es de 10 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano y una temperatura media anual de 26°C. La precipitación pluvial anual oscila entre los 1,300 y los 1,500 mm, con estación de lluvia de marzo a octubre. La vegetación se conforma de selva mediana subperennifolia y subcaducifolia, y selva baja subperennifolia. Dentro del área encontramos áreas urbanas pequeñas, siendo la mayor de estas Chunhuhub con 3,928 habitantes.

MATERIALES

Los insumos utilizados en este estudio se dividen en tres grupos: 1) los datos a evaluar obtenidos del sensor MODIS, 2) los datos auxiliares utilizados para mejorar las clasificaciones y 3) los datos para medir la fiabilidad de los mapas obtenidos.

En este estudio utilizamos algunos de los productos enfocados al estudio de las cubiertas terrestres (MODLAND) obtenidos con el satélite Terra. Una revisión de los productos MODLAND puede encontrarse en el capítulo 2. Estos productos fueron de la versión 5 y de dos tipos: 1) el producto de reflectancia de la superficie (MOD09): Se usaron datos compuestos de ocho días (MOD09Q1 y MOD09A1) e imágenes diarias (MOD09G0 y MOD09GA) a una resolución de 250 y 500 m, 2) el producto de índices de vegetación (MOD13Q1) (NDVI) y el índice de vegetación mejorado (EVI) con una resolución espacial de 250 m en compuestos de 16 días. Los datos se obtuvieron para un año completo y se componen por lo tanto de 24 composiciones de ambos índices de vegetación de 16 días, 365 imágenes diarias con 7 bandas cada una y 48 compuestos multispectrales de 8 días también con 7 bandas cada uno. Los datos auxiliares utilizados en cada área de estudio se indican en la tabla 1.

El procesamiento de los datos MODIS se llevó a cabo utilizando los programas *MODIS Reprojection Tool* (MRT) y *Land Data Operational Product Evaluation* (LDOPE) de acceso libre (ver capítulo 3). El cálculo de separabilidad se llevó a cabo utilizando el programa Multispec (<https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>). Las clasificaciones se hicieron con el programa IDRISI.

MÉTODOS

Para analizar los datos MODIS se siguieron tres pasos principales 1) el preprocesamiento que consistió en seleccionar las “mejores” bandas de entrada, 2) la cla-

TABLA 1. DATOS UTILIZADOS

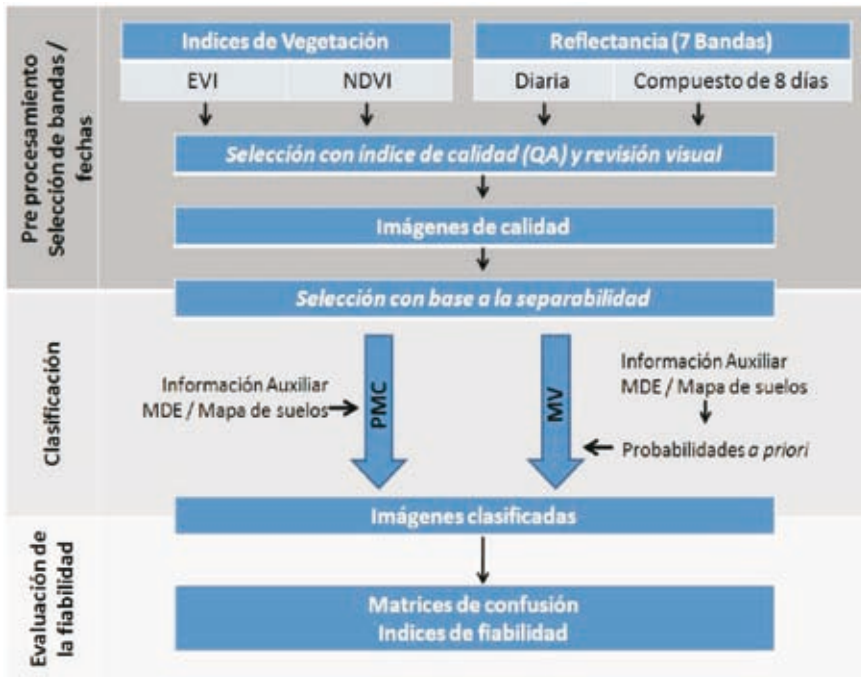
Área de estudio	Datos usados para definir los campos de entrenamiento	Datos auxiliares para MV	Datos auxiliares para PM	Datos para la evaluación de la fiabilidad
Tancítaro	IFN 2000, 1:250,000, Imagen Landsat 2003	INEGI serie III 1:250,000 (2003)	Elevación Suelos	600 puntos obtenido por interpretación de ortofotos, 1:20,000, 2002
Mazatán	IFN 2000, 1:250,000 Imagen SPOT 2003	INEGI serie III (2003) 1:250,000	Elevación Suelos	Mapa prototipo INEGI, 2003, 1:50,000
Área Maya	IFN 2000, 1:250,000 Imagen SPOT 2002	INEGI serie III (2003) 1:250,000	Suelos	Mapa obtenido por interpretación visual de imágenes SPOT

sificación de los datos seleccionados por dos métodos (uno paramétrico y otro no paramétrico), a los que también se incluyeron datos auxiliares y 3) la evaluación de la fiabilidad de los mapas obtenidos (Figura 2).

Preprocesamiento

Los productos MODIS se recortaron y reproyectaron desde su proyección original (sinusoidal) a la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM). Se evaluó el índice de utilidad de la capa de calidad para descartar las imágenes de baja calidad. En los índices de vegetación, este índice está codificado en los bits 2-5 y varía de 0 (más alta calidad) a 7 (imagen inutilizable). En los productos de reflectancia se encuentra en los bits 0-1 y varía de 0 (corregido a calidad ideal en todas las bandas) a 3 (no producido). Además en las imágenes diarias en los bits 2-3 se encuentra codificada la información sobre el estado de nebulosidad con los valores de 0 (pixel sin nube), 1 (pixel con mezcla de nube) y 2 (pixel con nube). Con base en el índice de utilidad se seleccionaron aquellos compuestos de reflectancia de 8 días e índices de vegetación que presentaron la más alta calidad en todos sus píxeles (imágenes presentando todos los píxeles con un índice de utilidad de cero).

FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO DESCRIBIENDO EL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE LOS DATOS MODIS



En las imágenes diarias se descartaron las escenas que presentaron 10% o más de píxeles con nube o bien, que tuvieron píxeles con un valor mayor a 0 en el índice de calidad. Se revisaron visualmente las imágenes seleccionadas.

Se elaboró un sistema clasificatorio con clases de cubierta basadas en las categorías de clasificación del INEGI (2007) y del IFN 2000. Para el Tancítaro, las categorías son: 1) bosque de pino-encino, 2) bosque de pino, 3) selva baja caducifolia, 4) agricultura de riego 5) huertas de aguacate, 6) agricultura de temporal 7) pastizales, 8) áreas sin vegetación y 9) áreas urbanas. En Quintana Roo, se usaron 6 categorías: 1) selva mediana sub-perennifolia, 2) selva baja sub-perennifolia, 3) vegetación hidrófila, 4) cuerpo de agua, 5) mosaico agrícola, y 6) áreas urbanas y en área de Mazatán, solamente cuatro: 1) Matorral (incluye mezquital), 2) agricultura, 3) bosque de encino y 4) área urbana.

Estos sistemas clasificatorios, sobre todo el del Tancítaro, son más detallados comparados con los que se usan generalmente en este tipo de imágenes, como el

sistema clasificatorio del IGBP que tiene 16 categorías a nivel mundial (Belward et al., 1999; Running et al., 1995).

Se elaboraron campos de entrenamiento con la ayuda de las imágenes de satélite y la cartografía disponible. Generalmente, el desempeño del clasificador aumenta al aumentar el número de bandas de entrada. Sin embargo, a partir de un cierto número de bandas, el desempeño ya no aumenta, e inclusive disminuye. Este efecto de saturación, conocido como el efecto Hughes, afecta a los clasificadores de máxima verosimilitud y a las redes neuronales (Landgrebe, 2003; Mas y Flores, 2008). Para identificar el número óptimo de bandas y el conjunto de bandas más eficiente para diferenciar las categorías que se pretenden cartografiar, se puede evaluar la separabilidad entre pares de categorías a través del cálculo de la distancia entre las muestras (campo de entrenamiento) en el espacio multidimensional definido por un cierto conjunto de variables de entrada. Este enfoque permite identificar que categorías se confunden entre sí (aquellas que presentan poca separabilidad) y toma en cuenta los valores de separabilidad de todos los pares de categorías, para definir la combinación de bandas de entrada que permite la mejor separabilidad general (Landgrebe, 2003). Con el objeto de reducir la dimensionalidad de la base de datos se evaluó la separabilidad, a través del cálculo de la divergencia transformada (DT) porque permite prever el desempeño del clasificador de máxima verosimilitud (Mausel et al., 1990), indicando cuantas y cuales bandas son suficientes para discriminar las clases de interés. Los valores de la DT fluctúan entre 0 y 2000, donde el valor de 2000 representa la separabilidad máxima entre los pares de clases. El cálculo de la separabilidad se hizo primero por cada tipo de producto MODIS (compuestos multispectrales, imágenes diarias e índices de vegetación), y en una segunda fase para combinaciones de productos. Para evitar que la alta dimensionalidad de los datos afecte el cálculo de la separabilidad, la búsqueda de las bandas con más "poder de separación" se hizo procesando subconjuntos aleatorios de bandas de forma iterativa. Para evaluar cada conjunto de bandas, se tomó en cuenta el valor mínimo de separabilidad, correspondiente el par de categorías que más tienden a confundirse.

Clasificación de las imágenes MODIS

Para conducir las clasificaciones se eligieron dos clasificadores: de máxima verosimilitud (MV) y el Perceptrón Multicapa (PM). El clasificador de *máxima verosimi-*

litud (o máxima probabilidad) es el algoritmo más comúnmente utilizado en percepción remota, ya que es sencillo de aplicar e interpretar los resultados que arroja, además de considerarse uno de los procedimientos de discriminación más eficientes, siempre y cuando los datos sigan una función de distribución normal (Maselli et al., 1992). En la fase de aprendizaje, el algoritmo elabora el “patrón espectral” de cada categoría con base en la media y de la varianza/covarianza de un conjunto de sitios de entrenamiento localizados en la imagen. En la fase de clasificación, se calcula, para cada pixel, la probabilidad de pertenencia a cada categoría con base en su respuesta espectral (ecuación 3). El pixel se asigna finalmente a la clase a la cual es más probable que pertenezca de acuerdo a la información espectral.

$$P(H | E) = \frac{p(E | H) p(H)}{p(E)} \quad (3)$$

Donde:

$P(H|E)$ es la probabilidad condicionada de la hipótesis H dado evidencia E , es decir la probabilidad que el pixel pertenezca a cierta categoría (hipótesis H) tomando en cuenta su respuesta espectral (evidencia E),

$p(H)$ es la probabilidad *a priori* de la hipótesis H , es decir la probabilidad que un pixel pertenezca a la categoría considerada en la hipótesis H sin tomar en cuenta su información espectral.

$p(E)$ es la probabilidad de la evidencia E ,

$p(E|H)$ es la probabilidad condicionada de la evidencia E dada la hipótesis H .

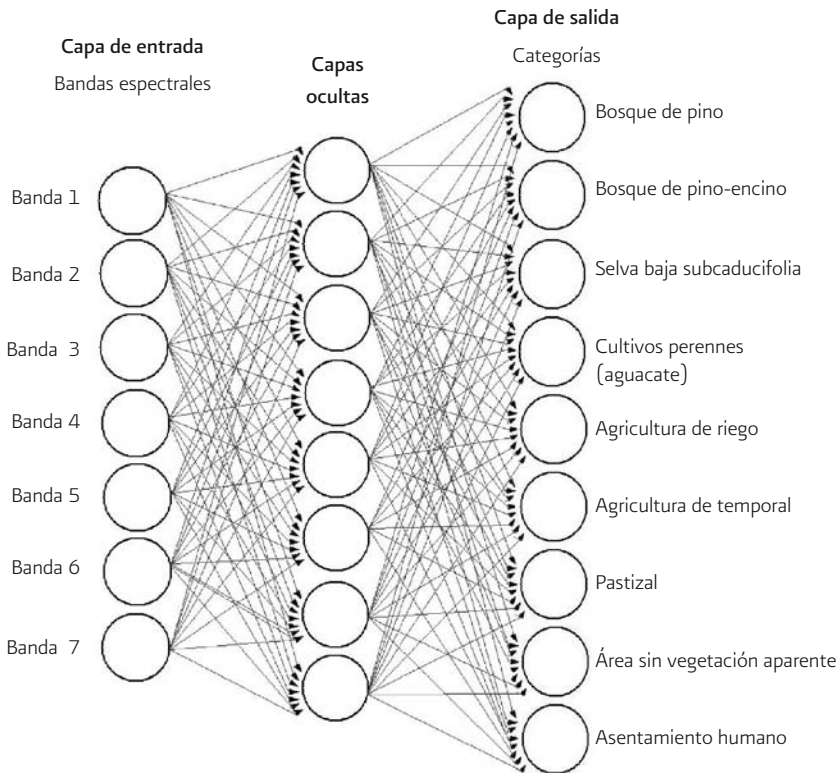
En ausencia de información sobre la probabilidad *a priori* de encontrar cierta categoría en determinado sitio, se supone que las probabilidades *a priori* $p(H)$ son iguales para todas las categorías y en toda la imagen, es decir que si se consideran n categorías, esta probabilidad es igual a $1/n$ (ecuación 4).

$$P(H | E) = \frac{p(E | H) (1/n)}{p(E)} \quad (4)$$

El *perceptrón multicapa* (PM), es el algoritmo de redes neuronales más utilizado debido a su capacidad de tolerancia ante información incompleta o contaminada con ruido (Mas y Flores, 2008). Consiste en un modelo estadístico no paramétrico de

regresión no lineal (Sarle, 1994; Bishop, 1995) y se describe como una red de alimentación hacia adelante compuesta por una capa de unidades (neuronas) de entrada (en este caso una unidad por banda), otra capa de unidades de salida (una unidad para cada categoría) y un número determinado de capas intermedias de unidades de procesamiento, también llamadas capas ocultas porque no tienen conexiones con el exterior. Las neuronas de cada capa están conectadas a todas las unidades de la capa siguiente (Figura 3). Con esta red se pretende establecer una correspondencia entre un conjunto de entrada (respuesta espectral por ejemplo) y un conjunto de salidas deseadas (categorías de cubierta del suelo). Generalmente, el PM usa una sola capa oculta para dividir completamente el espacio espectral por medio de hiperplanos a lo largo del cual el nivel de activación de las unidades ocultas es constante (Foody, 2000).

FIGURA 3. RED NEURONAL PERCEPTRÓN MULTICAPA PARA CLASIFICAR UNA IMAGEN DE SIETE BANDAS EN NUEVE CATEGORÍAS



En el PM, la señal que se transmite es un valor numérico. Cada conexión entre dos neuronas está asociada a un peso de ponderación que controla la fuerza de una interconexión. La neurona recibe como señal de entrada la suma de las señales de salida de las neuronas de la capa anterior, ponderada por su respectivo peso. Esta señal de entrada es transformada por una función de activación, generalmente sigmoïdal, que permite generar una señal de salida que se transmite a las neuronas de las capas siguientes. En un PM cuyo objetivo es clasificar, cada neurona de salida está asociada a una categoría, la categoría final corresponde a la neurona que presentan la señal, o valor de activación, más grande. El valor de activación de cada categoría puede interpretarse con un valor de pertenencia difusa ya que estos valores no se pueden considerar como probabilidad en sentido estricto como en el caso del método de la máxima probabilidad.

Al inicio, los pesos de ponderación de cada conexión se determinan de manera aleatoria, y la respuesta del PM es por lo tanto totalmente errónea. Con base en los datos de entrenamiento, se modifican los pesos para obtener las respuestas correctas. El procedimiento de aprendizaje es sencillo: si la red da la respuesta equivocada, los pesos se corrigen de tal manera que el error disminuye. Los datos de entrenamiento se presentan iterativamente para ajustar los pesos y obtener el mejor ajuste entre valores esperado y obtenido por la red. El método de entrenamiento más conocido es el de retro-propagación (*back propagation*). En este algoritmo, se compara, con base en los datos de entrenamiento, la señal de salida de la red con el valor esperado para calcular el error. El error es entonces retroalimentado por la red y los pesos de las conexiones se alteran para minimizar este error (Bishop, 1995).

Clasificación con información auxiliar

La incorporación de datos auxiliares en la clasificación ha mostrado aumentar la fiabilidad de los mapas obtenidos (Hutchinson, 1982), por lo que en este estudio se probaron dos formas de incorporar datos auxiliares.

Las características del método de *máxima verosimilitud* lo hacen ideal para incorporar datos auxiliares aumentando su desempeño y conservando las ventajas del método original (Maselli et al., 1995; Wulder et al., 2006). Se generaron mapas de probabilidades *a priori* $p(H)$ para cada una de las categorías, aplicando un filtro paso-bajo de 2×2 km² en el mapa de uso del suelo y vegetación de INEGI. En términos prácticos, para cada pixel, estos mapas de probabilidad *a priori* dismi-

nuyen o anulan la probabilidad que el clasificador escoja una categoría que no esté presente en los alrededores del pixel en el mapa de referencia (ver ecuación 3).

En el caso de las redes neuronales, los datos auxiliares utilizados en las tres áreas fueron mapas de suelos, además de datos de elevación de INEGI en las áreas de Mazatán y Tancítaro.

Con estos datos se generaron mapas de "probabilidad" *a priori* (Mas, 2004) que se combinaron con los valores de activación del PM entrenado con los datos de MODIS. Para ello, cada modelo digital de elevación y/o suelos, fue clasificado por otro PM usando el mapa de uso del suelo y vegetación de INEGI como campos de entrenamiento y reteniendo los valores de activación de la clasificación. Cada mapa expresa por lo tanto, para cada pixel, la posibilidad (no se puede hablar de probabilidad en el sentido estricto) de encontrar cada una de las categorías de cubierta tomando en cuenta la elevación. En Tancítaro y Mazatán los mapas de suelos y elevación de INEGI se sobrepusieron para calcular la probabilidad condicional de cada categoría de cubierta para cada tipo de suelo, mientras que en el área maya la probabilidad condicional estuvo representada solo por las activaciones derivadas del mapa de suelos. Estos mapas de "posibilidad" se combinaron, categoría por categoría, con el mapa de valores de activación de la clasificación con datos MODIS tomando en cuenta el valor mínimo de los valores de cada mapa (derivados de la elevación, y/o suelo y de los datos MODIS), lo cual corresponde al operador AND en lógica difusa. Finalmente, el pixel se clasificó en la categoría que presentaba el valor máximo de posibilidad final.

Análisis de la fiabilidad

Para evaluar la fiabilidad, los datos de referencia en Tancítaro estuvieron representados por 600 sitios de verificación seleccionados con base en un muestreo aleatorio estratificado (Stehman y Czaplewski, 1998). La interpretación de los sitios se hizo mediante un enfoque difuso (Woodcock y Gopal, 2000; Couturier et al., 2009): En el caso de que un sitio estuviera situado en el límite entre dos categorías o en un área con clases mezcladas se dio opción para que ambas estuvieran representadas por lo que para calificar el mapa podía ser considerada como correcta cualquiera de las dos categorías.

En Mazatán y el área maya se utilizó como datos de referencia mapas elaborados con gran detalle, generados a partir de la interpretación visual de imágenes SPOT y trabajo de campo, el primero por INEGI 2003 y el segundo por la UNAM 2002 (tabla 2).

Se elaboraron matrices de confusión, las cuales permiten confrontar la información de los sitios de verificación y la imagen clasificada. A estas se les aplicó el método propuesto por Card (1982), incorporando los valores de proporción (áreas relativas) de cada una de las categorías consideradas.

Se calcularon los valores de la fiabilidad del usuario (proporción de sitios de verificación de la categoría considerada clasificados como tal) y del productor (proporción de sitios clasificado en la categoría considerada en el mapa que están correctamente clasificados). Estos dos índices de fiabilidad están relacionados con los errores de omisión y de comisión respectivamente. Para comparar estadísticamente la fiabilidad de los mapas obtenidos por los diferentes insumos y enfoques de clasificación, se utilizó la prueba no paramétrica de McNemar propuesta por Foody (2004), que permite evaluar la significancia estadística de diferencias en la fiabilidad de dos clasificaciones estimada con base en los mismos datos de verificación.

RESULTADOS

SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES

Por medio del análisis de las capas de calidad, se descartó un gran parte de los datos (tabla 2). Las imágenes descartadas corresponden a la época de lluvias (Figura 4).

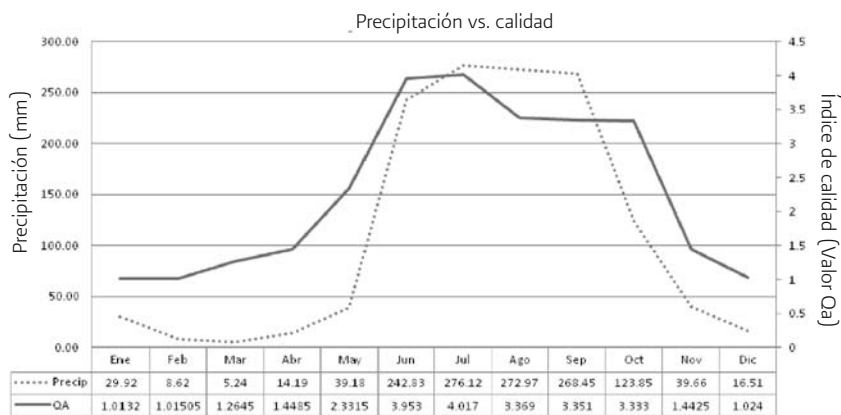
TABLA 2. NÚMERO DE BANDAS SELECCIONADAS CON BASE EN LA CAPA DE CALIDAD

Tipo de dato	Número original	Tancítaro Michoacán	Área Maya Q. Roo	Mazatán Sonora
IV	22	12	5	12
DIA	365	81	30	300
C8	48	21	4	44

IV: índices de vegetación, DIA: datos diarios, C8: Compuestos de 8 días

El índice utilizado (índice de utilidad) tiene un valor entre 0 (calidad óptima) y 7 (calidad nula). Se puede observar la coincidencia entre imágenes de baja calidad y la época de lluvias. En el caso de los datos de reflectancia (compuestos de 8 días e imágenes diarias), la información sobre calidad no permitió descartar la totalidad de las imágenes con nebulosidad y se efectuó un análisis visual adicional.

FIGURA 4. ÍNDICE DE CALIDAD PROMEDIO Y PRECIPITACIÓN PROMEDIA DURANTE EL AÑO 2002 (ÁREA DE ESTUDIO DEL TANCÍTARO)



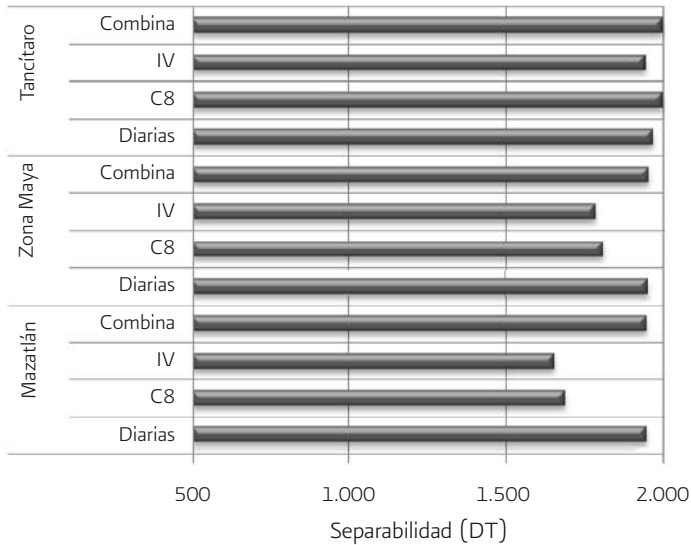
En la figura 5, que presenta los valores de separabilidad, se puede observar que todas las combinaciones de insumos permiten obtener la separabilidad óptima con un número reducido de bandas en todas las áreas. La combinación de bandas que permite obtener la mejor separabilidad, tiende a completar el rango espectral más que el temporal coincidiendo con el estudio de Carrão et al. (2008) donde observaron que la fiabilidad aumenta en la medida que se incorporan más fechas, pero que la contribución de este efecto desaparece al explotar la información de las 7 bandas. En cambio, aún teniendo información de todo un año de datos MODIS siempre fue necesario contar con por lo menos tres bandas espectrales para obtener una fiabilidad satisfactoria.

Sin embargo, este resultado está sesgado por la falta de disponibilidad de datos durante la época de lluvias ya que solamente en el área de Mazatán, algunas de las bandas escogidas fueron tomadas durante la época de lluvias. El uso de un número limitado de bandas en las clasificaciones permitió limitar el efecto Hughes.

Fiabilidad de las clasificaciones

La fiabilidad global alcanzada por los diferentes grupos de insumos y métodos de clasificación indican que de manera general en las tres áreas de estudio, la MV tuvo un mejor desempeño que el PM (Figura 6). Eso se debe tal vez a la diferencia en el tamaño de los campos (número de píxeles) de entrenamiento de las cate-

FIGURA 5. SEPARABILIDAD MÁXIMA ALCANZADA CON 7 BANDAS POR LOS DIFERENTES PRODUCTOS EN CADA ÁREA DE ESTUDIO



gorías debido a que no fue posible encontrar campos de entrenamiento grandes para ciertas categorías. En la MV el clasificador utiliza estadísticas derivadas de los campos de entrenamiento, el tamaño del campo no tiene mucha influencia siempre y cuando sea suficientemente grande para tener representatividad estadística. En el caso del PM, el algoritmo de aprendizaje que busca disminuir el error global por lo que tiende a subestimar las categorías poco representadas en los campos de entrenamiento.

En el área de Tancítaro, con los compuestos de reflectancia de 8 días el clasificador de MV alcanza a una fiabilidad global de 74%, con los datos combinados (reflectancias diarias, de 8 días e índices de vegetación) 76% (figura 6), lo cual, de acuerdo a la prueba de Mc Nemmar no representa una diferencia significativa.

En el análisis por clase del área del Tancítaro, observamos que la categoría de plantaciones de aguacate se clasifica satisfactoriamente con todos los tipos de datos y alcanzando fiabilidades de hasta 92% utilizando los datos combinados clasificados con el método MV. Mientras que la clase de agricultura de temporal no se distingue mediante ningún tipo de dato usando MV. Las clases de selva baja caducifolia, agricultura de riego, área urbana, pastizal y bosque de pino enci-

no resultan clasificadas correctamente con valores de por lo menos 70% usando datos combinados. El análisis de los datos por medio de PM es en general menor y presenta valores de fiabilidad confiables solo para las categorías de aguacate, selva baja caducifolia y datos combinados (tabla 3).

En el área maya no se observa una diferencia significativa de los resultados de acuerdo al tipo de dato, el clasificador MV clasifica de manera correcta 84% de los píxeles con los datos de reflectancia diarios, 84% con los compuestos de 8 días y 76% con los índices de vegetación (Figura 6). Sin embargo existe un sesgo ya que la mayoría del área corresponde a la selva mediana subperennifolia que cubre grandes extensiones del área de estudio. Esta se clasifica satisfactoriamente independientemente del tipo de dato y método de clasificación utilizado. El método PM clasifica satisfactoriamente la selva mediana con datos compuestos de 8 días e índices de vegetación, mientras que el resto de las clases presentan fiabilidades muy variables y bajas (tabla 3).

En el área de Mazatán, los datos que permitieron una mejor clasificación fueron los índices de vegetación, con un 69% de fiabilidad global, seguido de los compuestos de 8 días 66%, mientras que los datos diarios alcanzaron 63% (Figura 6). Todos estos resultados están por debajo de la fiabilidad aceptable (70%). Sin embargo en el análisis por clase observamos que con base en las imágenes diarias analizadas con MV, las clases de agricultura, área urbana y bosque de encino, obtienen fiabilidades por encima del 70%, mientras que el matorral presenta las fiabilidades más bajas 47% a 50% (tabla 3).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El índice de calidad fue parcialmente útil en la selección de imágenes de buena calidad. Si bien permitió descartar mediante un procedimiento automático las imágenes de mala calidad, fue luego necesaria una selección visual adicional para descartar imágenes de mala calidad que presentaron valores satisfactorios en el índice de calidad.

La selección de las bandas que permiten la mejor separabilidad muestra que la diversidad espectral es más importante que la temporal ya que las bandas seleccionadas corresponden a diferentes partes del espectro pero a fechas cercanas. Carrão et al. (2008) encontraron resultados similares en Portugal, aunque en nuestro caso existió un sesgo evidente al descartar casi por completo los datos durante el periodo de lluvias debido a su baja calidad.

FIGURA 6. FIABILIDAD GLOBAL ALCANZADA POR LOS VARIOS MÉTODOS/INSUMOS. MV; MÁXIMA VE-ROSIMILITUD, AUX-MV; DATOS AUXILIARES, PM; PERCEPTRÓN MULTICAPA, COMBINA; DATOS COMBINADOS

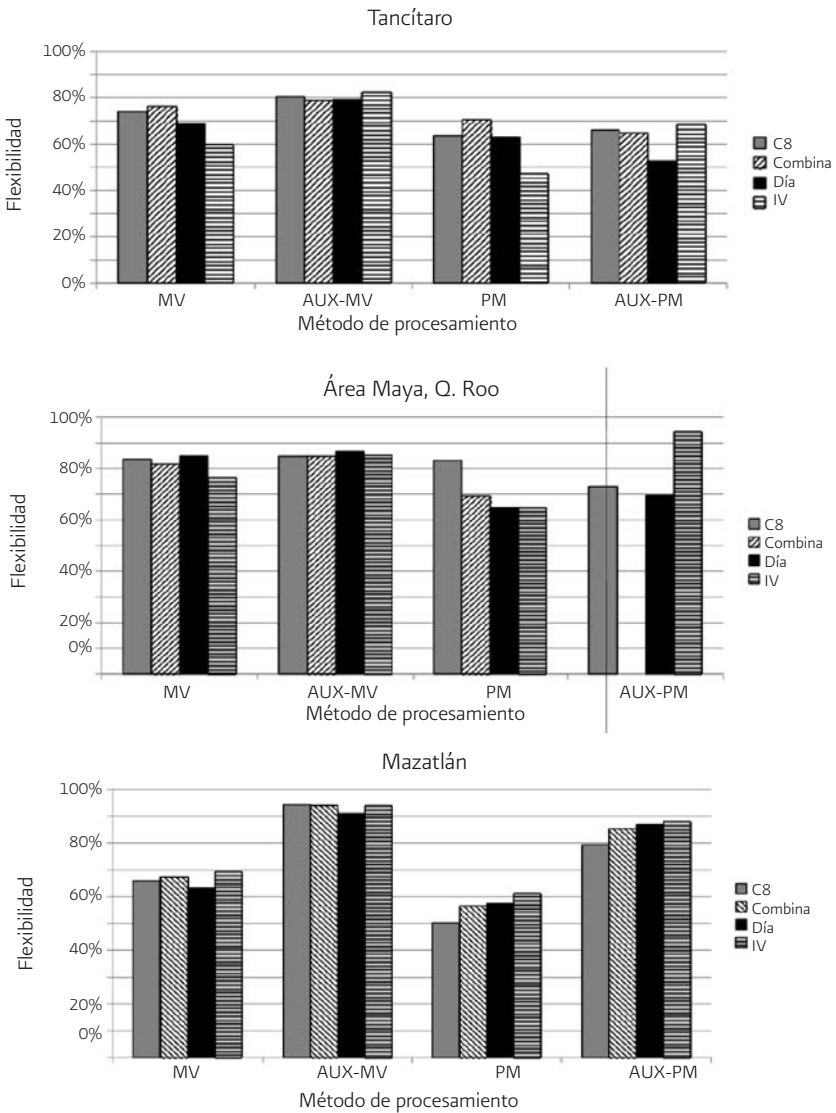


Tabla 3. FIABILIDAD DEL USUARIO Y DEL PRODUCTOR (EN %) POR CATEGORÍA DE LOS DATOS COMBINADOS EN CADA UNO DE LOS TIPOS DE CLASIFICACIÓN MV; MÁXIMA VEROSIMILITUD, AUX; DATOS AUXILIARES, PM; PERCEPTÓN MULTICAPA

Tancítaro	MV	AUX-MV		PM		AUX-PM		FIA PROD		FIA US	
	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	
Pino	57%	73%	76%	82%	24%	32%	39%	57%			
Aguacate	92%	81%	90%	83%	89%	73%	92%	69%			
Sin Veg	98%	63%	96%	64%	94%	64%	88%	35%			
SBC	81%	84%	85%	93%	86%	83%	83%	83%			
Ag Riego	71%	78%	86%	87%	43%	69%	34%	99%			
Área urbana	89%	72%	89%	64%	88%	63%	56%	100%			
pastizal	89%	79%	89%	74%	88%	88%	56%	84%			
BPO	75%	77%	78%	85%	47%	68%	48%	69%			
Ag Temporal	59%	54%	73%	75%	24%	33%	71%	52%			
Mazatán	MV	AUX-MV	PM	AUX-PM							
	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD			
Matorral	47%	50%	93%	97%	38%	39%	91%	91%			
Agricultura	74%	72%	62%	46%	52%	53%	20%	29%			
Bosque	82%	74%	83%	66%	81%	77%	80%	69%			
Urbano	76%	86%	68%	58%	27%	28%	78%	69%			
Área maya	MV	AUX-MV	PM	AUX-PM							
	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD			
Matorral	47%	50%	93%	97%	38%	39%	91%	91%			

TABLA 3. CONTINUÍA

Tancitaro	MV	AUX-MV		PM		AUX-PM		FIA US		FIA PROD	
	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	FIA US	FIA PROD	
Agricultura	74%	72%	62%	46%	52%	53%	20%	29%			
Bosque	82%	74%	83%	66%	81%	77%	80%	69%			
Urbano	76%	86%	68%	58%	27%	28%	78%	69%			

La incorporación de imágenes de probabilidad *a priori* derivado de un mapa de cubierta del suelo existente permitió un incremento significativo de la fiabilidad. Sin embargo, este método podría resultar a veces contraproducente en particular si el mapa de referencia es erróneo o desactualizado, ya que se podrían imponer los errores del mapa al combinar las probabilidades derivadas del análisis de las imágenes de percepción remota y las probabilidades *a priori* obtenidas del mapa. El tamaño de la ventana del filtro que se utiliza permite determinar el grado en el cual el mapa de referencia se plasma de manera estricta en las probabilidades. En el caso extremo de un filtro de 1 x 1 pixel, los pixeles perteneciente a un polígono del mapa tendrán una probabilidad uno para la categoría del polígono y cero para las demás, lo cual resultaría en imponer el mapa e ignorar la información de las imágenes. En el caso de Tancítaro, el 38% de los pixeles tienen una probabilidad superior a cero de pertenecer a dos categorías, 20% a tres y el 6% a cuatro o más. En la práctica, la información de las imágenes de percepción remota puede determinar la categoría en las áreas de contacto entre diferentes categorías pero no en áreas interiores homogéneas en las cuales solo la categoría del mapa de referencia tiene una probabilidad superior a cero.

El uso de datos auxiliares como elevación o suelos no fue tan eficiente como la introducción de probabilidades *a priori* derivadas del mapa de cubiertas del suelo. La evaluación de la fiabilidad alcanzada en las varias áreas de estudio utilizando solo la información auxiliar permitiría evaluar el valor agregado de los datos MODIS. Este ejercicio se realizará en futuras investigaciones.

Tomando en cuenta resultados basados en otro tipo de datos podemos decir que aun sin el uso de información auxiliar, se logró generar mapas con una fiabilidad satisfactoria. Por ejemplo, Couturier et al. (2006) evaluaron la confiabilidad de una clasificación basada en Landsat en una región cercana al Tancítaro, encontrando una fiabilidad promedio de usuario de 76% y de productor de 73%, mientras que en este estudio encontramos 80% y 74% respectivamente con datos combinados sin el uso de información auxiliar.

Basado en datos MODIS, Carrão et al. (2008) encuentran una fiabilidad media de usuario de 64% y de productor igual a 46% tomando en cuenta solo tres clases en su estudio realizado en Portugal, resultados muy por debajo de los obtenidos en este estudio un número de entre 4 y 7 categorías.

En cuanto a otros estudios realizados con datos MODIS, evaluamos la calidad del producto MOD12 que es un mapa de cubierta del suelo basado en el sistema de clasificación del IGBP en el área del Tancítaro, los resultados de la comparación

de las superficies obtenidas por MOD12 contra la base de datos utilizada para la evaluación de la fiabilidad muestran que este producto presenta errores de hasta el 44% de la superficie. Sin embargo, se debe considerar que el producto MOD12 se calibra para todo el continente americano.

Los resultados obtenidos nos permiten concluir que los datos MODIS pueden ser utilizados bajo métodos de análisis alternativos, obteniendo resultados satisfactorios con base en un sistema clasificatorio bastante detallado (Sistema IGBP o un poco más detallado) para una clasificación obtenida con datos de baja resolución espacial en territorios tan diversos y complejos como el mexicano.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se llevó a cabo en el ámbito del proyecto 47741 del Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal (CONAFOR-CONACYT). Los mapas de uso del suelo y vegetación (serie III, escala 1:250,000) y de Mazatán (escala 1:50,000) fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas, Geografía e Informática (INEGI) en el ámbito del convenio general de colaboración entre el INEGI y la UNAM (Licencias DGAD-0022/2008 y DGAD-0167/2008).

El primer autor agradece a la beca de doctorado otorgada por CONACYT en la convocatoria 2007. El segundo autor agradece el CONACYT y la DGAPA por el apoyo recibido durante la estancia en la Universidad de California – Santa Barbara durante la cual se terminó la elaboración de este capítulo. Ambos autores agradecen el equipo científico de MODIS por brindar los datos sin restricción.

REFERENCIAS

- Belward, A.S., Estes, J.E., Klin, K.D., 1999. The IGBP-DIS Global 1-km Land-Cover Data Set DISCover: A Project Overview, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65:1013-1020.
- Bishop, C.M., 1995. *Neural Networks for Pattern Recognition*: University Press. Oxford. 116-140.
- Card, H.D., 1982, Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48: 431-439.

- Carrão, H., Gonçalves, P., Caetano, M., 2008. Contribution of multispectral and multitemporal information from MODIS images to land cover classification, *Remote Sensing of Environment*, 112: 986–997.
- Couturier, S., J-F Mas, G. Cuevas, J. Benítez, A. Vega & V. Tapia, 2009. A thematic-focused accuracy assessment of land cover maps for highly biodiverse regions, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(7): 789–806.
- Couturier, S., Mas, J.F., López, E., Cuevas, G., Vega, A., Tapia, V., 2006. Accuracy Assessment Methodology for the Mexican National Forest Inventory: a Pilot Study in the Cuitzeo Lake Watershed, Proceedings of Accuracy 2006, 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, editado por M. Caetano & M. Painho, Instituto Geográfico Português, Lisboa, Portugal, pp. 578–587.
- Foody, G.M., 2000. Mapping Land Cover from Remotely Sensed Data with a Softened Feedforward Neural Network Classification, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 29: 433–449.
- Foody, G.M., 2004. Supervised image classification by MLP and RBF neural networks with and without an exhaustively defined set of classes, *International Journal of Remote Sensing*, 25: 3091–3104.
- Hutchinson, C.F., 1982. Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48: 123–130.
- INEGI, 2007. Diccionario de datos de Uso del Suelo y Vegetación, 1:250,000 (vectorial), 56 p.
- Landgrebe, D., 2003. Signal theory methods in multispectral remote sensing: Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Lu, D., Weng Q, 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance, *International Journal of Remote Sensing*, 28: 823–870.
- Mas, J.F., 2004. Mapping land use/cover in a tropical coastal area using satellite sensor data, GIS and artificial neural networks, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59: 219–230.
- Mas, J.F., Flores J.J, 2008. The application of artificial neural networks to the analysis of remotely sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, 29: 617–663.
- Mas, J.F., T. García-Mora, MODLAND. 2011. Los productos de superficie terrestre MODIS, in Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio, INE-SEMARNAT, CIGA-UNAM, pp. 25-70.

- Mas, J.F., Velázquez, A., Palacio-Prieto, J.L., Bocco, G., Peralta, A., Prado, J., 2002. Assessing forest resources in Mexico: Wall-to-wall land use/cover mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68: 966-968.
- Maselli, F., Conese, C., De Filippis, T., Romani, M., 1995. Integration of ancillary data into a maximum-likelihood classifier with nonparametric priors: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 50: 2-11.
- Maselli, F., Conese, C., Petkov, L., Resti, R., 1992. Inclusion of prior probabilities derived from a nonparametric process into the maximum-likelihood classifier, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58: 201-207.
- Maussel, P., Kramber, J., Lee, J., 1990. Optimum band selection for supervised classification of multispectral data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56: 55-60.
- Millington, A.C. y R.W. Alexander, 2000. Vegetation Mapping in the last Three decades of the Twentieth Century, in: *Vegetation Mapping: from Patch to Planet*, editado por R. Alexander y A.C. Millington, John Wiley & Sons.
- Palacio-Prieto, J.L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J.F., Takakai, F., Victoria, A., Luna-González, L., Gómez-Rodríguez, G., López-García, J., Palma-Muñoz, M., Trejo-Vázquez, I., Peralta-Higuera, A., Prado-Molina, J., Rodríguez-Aguilar, A., Mayorga-Saucedo, R., González-Medrano, F., 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000, *Investigaciones Geográficas*, 43: 183-203.
- Running, S.W., Loveland, T.R., Pierce, L.L., 1995. A vegetation classification logic based on remote sensing for use in global scale biogeochemical models, *Remote Sensing of Environment*, 51: 39-48.
- Sarle, W.S., 1994. Neural networks and statistical models (resumen), in *Proceedings of the 19th Annual SAS Group conference*: Cary, NC, 1538-1550.
- Stehman, S.V., Czaplewski, R.L., 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles, *Remote Sensing of the Environment*, 64: 331-344.
- Woodcock, C., Gopal S., 2000. Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation, *International Journal of Geographical Information Science*, 14: 153-172.
- Wulder, M.A., Franklin, S.E., White, J.C., Linke, J., Magnussen, S., 2006. An accuracy assessment framework for large-area land-cover classification products derived from medium-resolution satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 27: 663-683.

CAPÍTULO 10

Efectos de la agregación espacial en la estimación de temperatura del aire mediante imágenes MODIS

Edgar Ricardo Rosales Arriaga, Felipe Omar Tapia Silva

RESUMEN

Los datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) provienen de 3,286 sitios de observación. Si cada dato fuera representativo de 100 km², como se supone en zonas planas, el máximo posible de cobertura sería del 16.8% del territorio nacional. Considerando la variabilidad del relieve de nuestro país, esta cobertura es en realidad aún menor, por lo que resulta evidente la existencia de un problema de representatividad espacial de los datos medidos por el SMN. Consecuentemente, es necesario obtener modelos que permitan mejorar la representatividad espacial de estos datos para hacerlos más útiles a las escalas regional y local.

En este artículo se investiga la posibilidad de estimar temperatura del aire (T_a) usando valores de temperatura superficial (LST). Los productos de MODIS utilizados son: MOD11A2.V5 y MYD11A2.V5. Las series de tiempo de 2007 y 2008 analizadas son representativas de los tres periodos de la climatología mexicana (primavera, verano e invierno). Los datos de T_a son agrupados y promediados cada ocho días, de acuerdo al día juliano, y reproyectados uniformemente para garantizar su sobreposición. La comparación se efectúa a diferentes escalas de agregación espacial (cuencas, estado y nacional) a nivel de pixel y la localización geográfica de cada dato reportado. La forma de obtener los modelos de estimación es mediante análisis de correlación univariada y multivariada.

Los resultados indican que no en todas las escalas de agregación espacial es posible obtener modelos de estimación de T_a utilizando LST.

INTRODUCCIÓN

La temperatura superficial (LST) es un parámetro clave en la física de los procesos superficiales terrestres en escalas globales y regionales, combinando los resultados de todas las interacciones atmósfera-superficie y flujos de energía entre la atmósfera y el terreno (Wan 2008). De acuerdo con Jones Jr. et al. (2004) LST derivado de satélites se define como la temperatura de radiación de la superficie observada por los sensores de los satélites. La superficie terrestre se define como la parte superior del follaje en áreas vegetadas o la superficie del suelo en zonas sin vegetación (Wan 2008). Jones, Jr. et al. (2004) completan esta definición mencionando que la superficie terrestre está cubierta de vegetación, el suelo, o cualquier objeto de otra superficie y que la LST sólo puede ser estimada en condiciones de cielo despejado de nubes a través del infrarrojo (IR). Lo anterior debido a que la mayoría de los canales del infrarrojo se ven afectados al pasar por las nubes que absorben la energía en estos canales. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), montado sobre los sistemas de satélites de observación terrestre Aqua MYD11A2.V5 y Terra MOD11A2.V5 de la NASA (ver ilustración 1 C y D), provee diversos productos de LST en una base diaria, semanal y sextenal. De acuerdo con Wang et al. (2008) estos productos no han sido adecuadamente validados. Para identificar las limitaciones que el producto de LST-MODIS pueda tener, en el presente trabajo se realizan comparaciones contra mediciones en tierra de temperatura del aire (T_a). Se intenta definir coincidencias entre ambas mediciones que permitan generar modelos para estimar T_a mediante LST. Las comparaciones se realizan a diversos niveles de agregación espacial (estado, nacional y región hidrológica) para tres fechas de los años 2007 y 2008, que pueden considerarse representativas de las temporadas presentes en la climatología de México (primavera, verano e invierno).

REVISIÓN DE LA LITERATURA

La cantidad y la calidad de los productos LST de MODIS dependen de condiciones de un cielo sin nubes debido a la limitación inherente de la percepción remota basada en la banda termal infrarroja (Wan 2008). Este autor también menciona que

todavía no es posible obtener valores reales bajo el efecto de las nubes en comparación con mediciones de campo.

Wang et al. (2008) comparan dos productos diarios de LST del satélite MODIS Terra, MOD11_L2.v4 y MOD07_L2.v4 con mediciones en tierra en ocho sitios con vegetación. Estos autores encontraron diferencias en el rango de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sesgos absolutos) y RMSEs de alrededor de $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. De acuerdo con Wang et al. (2008) los errores en ambos productos tienen una dependencia débil del ángulo de visión cenital del sensor, pero son independientes de la temperatura superficial del aire, humedad, velocidad del viento y la humedad del suelo. Wan (2008) realizó comparaciones entre LST MODIS versión 5 y valores observados en campo en 47 casos con condiciones de cielo despejado (en el rango LST de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con una columna atmosférica con rangos de vapor de agua con rango de 0.4 a 3.5 cm). Wan encontró que la precisión del producto LST MODIS es menor que 1 K en la mayoría de los casos (39 de 47) y el error medio cuadrático de las diferencias es inferior a 0.7 K para todos los 47 casos.

Según Wan (2008) los sitios de validación deben ser seleccionados cuidadosamente debido a la gran variación espacial de LST, sobre todo durante el día. Este autor señala que a fin de medir LST in-situ en la escala de 1 km con una incertidumbre por debajo de 1 K , deben ser seleccionados sitios homogéneos de al menos 5 km por 5 km . El autor indica que es necesario el uso de radiómetros de TIR de alta precisión en las mediciones en múltiples puntos. Asimismo, Wan (2008) indica que estos requisitos no pueden ser cubiertos por las mediciones en la mayoría de estaciones climatológicas convencionales o las estaciones equipadas con torres (redes netflux) diseñadas para otros fines, no obstante, el autor señala que los datos de temperatura recogidos en las estaciones meteorológicas son útiles para comprobar cualitativamente la tendencia de las variaciones estacionales de LST. Sin embargo, para otros autores (Kawashima et al. 2000, Jones, Jr., et al. 2004, Mostovoy et al. 2006) es posible obtener los valores de la temperatura del aire a partir de datos LST mediante una regresión lineal entre ambas variables. Según Jones, Jr., et al. (2004) LST está altamente correlacionada con T_a , aunque esto puede variar con los cambios atmosféricos, estacionales y geográficos. Kawashima et al. (2000) encontraron que LST por sí sola explica el 80% de la variación observada en T_a . En este estudio la exactitud de la estimación de la T_a usando LST fue mejorada por regresión múltiple entre LST promediada espacialmente e índice normalizado de vegetación (NDVI). Mostovoy et al. (2006) examinaron la importancia de la resolución espacial (comparando tamaños de pixel de 1.0 y 5.0

km²), el tiempo de paso del satélite, la estación del año, el tipo de cobertura terrestre, y la fracción de la vegetación (en función del ángulo cenital de visión del instrumento MODIS) en el nivel observado del coeficiente de correlación (r) entre temperatura máxima del aire y LST. Los autores encontraron que la diferencia entre las variables comparadas temperatura máxima del aire y LST aumentó linealmente con el ángulo de visión (con rango típico de 1.2 °C para los cambios de ángulo de 0° a ± 65°) y se mantuvo constante o ligeramente menor para las temperaturas mínimas diarias del aire. También observaron que tanto LST de Terra y Aqua con píxeles de 1.0 km exhibieron un aumento pequeño pero constante de r entre temperatura máxima del aire y LST en comparación con el de la utilización de 5.0 km² LST. Cuando cambiaron de Terra a Aqua LST los autores no encontraron diferencias significativas en los valores de r . Mostovoy et al. (2006) concluyen que la diferencia de tiempo entre el momento del paso del satélite y el tiempo de observación de la temperatura máxima o mínima del aire prácticamente no ejercen influencia en el valor de r entre T_a y LST a las escalas espaciales involucradas.

Vancutsem et al. (2010) analizaron los productos LST agrupados cada 8 días de los sensores Terra y Aqua (MYD11A2, MOD11A2), así como el producto diario de LST (MYD11A1). Encontraron que los productos nocturnos de MODIS ofrecen una buena estimación de la T_a mínima en diferentes tipos de ecosistemas. Así mismo, obtuvieron un error absoluto de 1.73°C y una desviación estándar de 2.4°C. Para el caso de T_a máxima observaron que la coincidencia con productos diurnos de MODIS depende de la temporada, el tipo de ecosistemas de la radiación solar y de la cobertura nubosa. Estos mismos autores no encontraron gran influencia del NDVI y del ángulo del cenit solar.

Mao et al. (2008) utilizaron las bandas del térmico infrarrojo 10 a la 14 de Aster para obtener LST y emisividad superficial y mediante un modelo basado en redes neuronales determinaron T_a . Los datos de entrenamiento y de prueba fueron obtenidos mediante el modelo de transferencia de Radianza MODTRAN (Berk et al. 1987). Los autores obtuvieron una buena estimación de T_a con un error medio y una desviación estándar apenas mayor a 2.0 K. Un enfoque un tanto diferente fue el propuesto por Pridhodko y Goward (1997). Estos autores utilizaron observaciones de NDVI provenientes de imágenes AVHRR con un ángulo de cenit mayor a 40° para correlacionarlos directamente con observaciones en campo de T_a y obtuvieron buenos niveles de correlación ($r=0.86$). En este estudio se consideró la estimación del NDVI completamente saturado en follaje (Full Canopy Saturated NDVI). Los autores observan sin embargo que las pendientes de la ecuación son

mayores que 1 y que por ello es posible que la ecuación pueda sobreestimar T_a a valores mayores de NDVI.

En conclusión la revisión de literatura indica que las características y condiciones específicas para la estimación de T_a utilizando productos de percepción remota como LST y NDVI siguen siendo investigados.

REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL DE LAS MEDICIONES CLIMÁTICAS

Las tendencias climáticas regionales no pueden deducirse de los registros de un solo sitio, incluso en un terreno relativamente homogéneo (Pielke et al. 2000). Por lo tanto, es necesario considerar más puntos de medición de campo a fin de capturar la variabilidad espacial de este parámetro a escala regional. Acerca de este tema Daly (2006) señala que el espacio de 100 km entre estaciones probablemente sea insuficiente para representar los patrones climáticos causados por los factores que influyen el clima (como la altitud y las zonas costeras). Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2006) la representatividad de una observación es el grado en el que describe de manera adecuada el valor de la variable necesaria para un propósito específico. La WMO (2006) también menciona que lograr una buena ubicación de las estaciones para toma de datos es difícil. Por su parte Daly (2006) indica que una estación en una zona montañosa o costera es probable que solo sea representativa en la escala local (menos de 3 km). Los errores producidos por toma de datos de estaciones poco representativas pueden ser mucho mayores que los que pueden esperarse de una estación aislada (WMO, 2006). Esa es la razón por la que elegimos en este estudio, un procedimiento que compara el valor de píxeles procedentes del sensor MODIS (con una resolución de 1.0 km) con el valor de la estación situada en la zona del píxel. Eso significa una comparación a escala local de acuerdo a la definición de la WMO (2006), que permite no considerar elevación y otros factores que influyen en el clima (mencionados por Daly, 2006), en la comparación entre ambos valores.

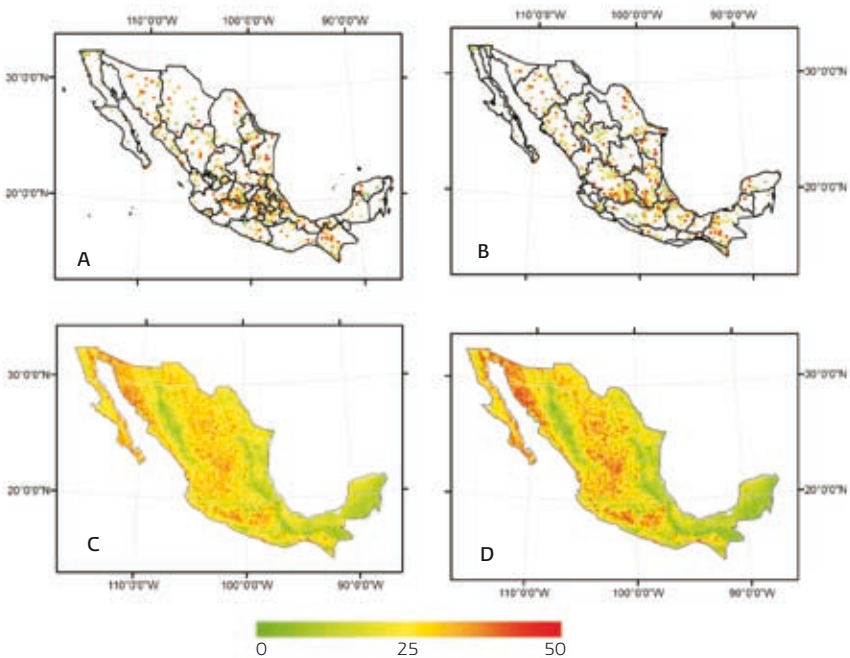
La extensión territorial de México es de aproximadamente 1,965,000 Km² de los cuales unos 5,100 Km² corresponden a superficie insular y el resto es superficie continental. Los datos meteorológicos reportados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) provienen de 3,286 sitios de observación entre los que se encuentran observatorios, estaciones climatológicas convencionales y automáticas. Comúnmente se estima que cada dato reportado es representativo de un área de 100 Km² en una zona plana (Daly, 2006). De acuerdo a lo anterior, en México

se cubre un área de 328,600 km² (asumiendo que la superficie fuera plana) que representa solo el 16.8% del territorio nacional. Considerando esta información se hace evidente que la mayoría de los cálculos realizados a nivel regional y nacional carecen de una buena representatividad de las variables meteorológicas y por lo tanto generalizan los valores de variables que deberían ser más consistentes para su utilización en modelos. Por tal motivo es necesario obtener mejores estimaciones de datos meteorológicos a las escalas local, regional y nacional (Figura 1).

METODOLOGÍA

En este artículo se comparan valores de temperatura superficial (LST) obtenidos de imágenes MODIS con datos de temperatura del aire (Ta) proveniente de estaciones

FIGURA 1. VALORES DE TEMPERATURA DEL AIRE (Ta) MEDIDAS EN LAS ESTACIONES EN MÉXICO PARA LA FECHA DEL 22 AL 29 DE ABRIL DEL 2007 (DÍA JULIANO 113). A) AGRUPACIÓN POR ESTADOS Y B) POR REGIONES HIDROLÓGICAS. EJEMPLOS DE UN MOSAICO (6 TILES) DE PRODUCTOS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL (LST) DE MODIS C) TERRA Y D) AGUA



climatológicas y observatorios del SMN con la finalidad de investigar efectos de la agregación espacial de las mediciones en tierra en las posibilidades de estimar Ta usando LST. Para cada uno de los niveles de agregación de datos (país, estados y regiones hidrológicas ver figura 1A y 1B) se utilizan periodos de ocho días y no diarios o instantáneos, ya que los periodos de ocho días permiten una representación estable (no tan expuesta a pérdida de información y a aleatoriedad de la misma) de la variabilidad temporal y espacial tanto para LST como de Ta. De esta forma se minimizan los errores por la falta de datos como los que se presentan en las imágenes diarias de MODIS o por la falta de datos reportados por las estaciones meteorológicas convencionales y/o automáticas. Se analizan todos los estados y las regiones hidrológicas 09 Sonora Sur, 12 Lerma-Santiago y 30 Grijalva-Usumacinta definidas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2008).

Se analizan tres fechas de dos años diferentes (2007 y 2008) consideradas por los autores del presente artículo como representativas de la climatología en el país (periodos de ocho días con inicio de días julianos 113, 257 y 337, respectivamente para primavera, verano e invierno). Se consideran los satélites Terra y Aqua lo que significa que se analizan productos de 12 imágenes diferentes.

Para correlacionar datos de LST y Ta es necesario utilizar el mismo datum y sistema de coordenadas para así garantizar una perfecta extracción de datos de LST para cada uno de los datos de Ta reportados por el SMN. La información fue agrupada de acuerdo a los diferentes niveles de agregación y se procedió al análisis de correlación. El modelo generado fue aplicado a cada uno de los pixeles correspondientes a la ubicación de las estaciones meteorológicas de cada región analizada.

Para el cálculo de NDVI se utilizaron las bandas 1 y 2 de las imágenes MOD09A2.V5 y MYD09A2 ya que los productos de NDVI publicados por MODIS como MOD13A2 y MYD13A2 cuentan con una resolución temporal de 16 días julianos. Las imágenes se procesaron de igual forma que la de los productos de LST de MODIS descritos anteriormente (ver capítulo II), el único cambio relevante en el proceso es que el factor de reescalamiento de valores es de 0.0001.

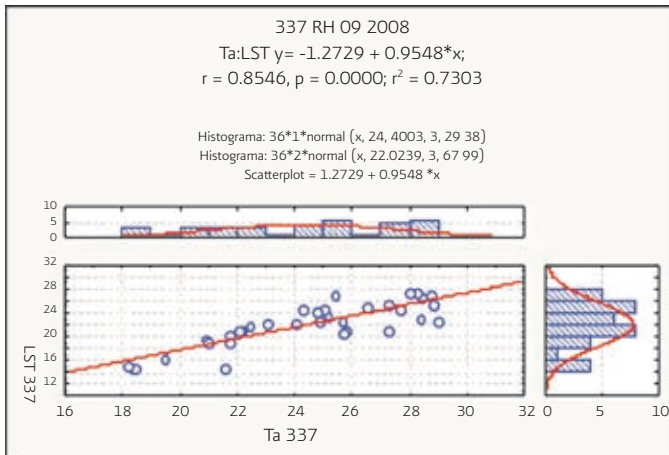
La base de datos proporcionada por el SMN solo toma en cuenta datos validados por el personal del SMN. En este estudio los datos faltantes, estimados, dudosos o no confirmados son eliminados. Esto permite obtener una mejor base de comparación entre Ta y LST en el territorio nacional. Los datos de temperatura del SMN son agrupados y promediados cada ocho días de acuerdo al día juliano y solo son utilizados los que reportan una frecuencia mayor o igual a seis

días y el promedio se da entre el acumulado y la frecuencia de cada periodo de datos (Figura 2).

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

La comparación de valores de temperatura (a nivel de país, estado y región hidrológica) se efectúa en una primera etapa pixel a pixel por medio de la localización geográfica de cada dato reportado por el SMN. La forma de obtener los modelos es mediante análisis de correlación de los datos reportados por el SMN para cada uno de los niveles de análisis. Para el caso de regiones hidrológicas se eligieron las que pueden ser representativas de las condiciones observadas en el país (una en el norte árido, otra en la meseta alta del centro y la última en el trópico húmedo). Los criterios para definir el nivel de la correlación son los siguientes: $r < 0.3$ baja, r entre 0.3 y 0.6 mediana o moderada y $r > 0.8$ de forma similar a lo propuesto por Downie (1973). A pesar de tomar los anteriores criterios, se reconoce que la calificación de los niveles de correlación no es única ni invariable, sino como lo indica la autora antes mencionada depende de la naturaleza del problema que se está modelando.

FIGURA 2. MEJOR CORRELACIÓN OBTENIDA ENTRE T_a Y LST AL AGREGAR ESTACIONES POR REGIÓN HIDROLÓGICA. LST CORRESPONDE AL SENSOR MODIS AQUA PARA EL DÍA JULIANO 337 DE 2008



RECURSOS DE INFORMACIÓN

Los productos analizados corresponden a: MOD11A2.V5 y MYD11A2.V5 (Land Surface Temperature & Emissivity, versión 5) correspondientes a imágenes MODIS Terra y Aqua respectivamente. Ambos productos son presentados por MODIS como listos para su uso en publicaciones científicas (USGS LP DACC, 2009). Tienen una resolución espacial de 1 Km² (0.93 Km²) por pixel y son el resultado de una composición de ocho días (daytime and nighttime) con una confiabilidad del 95% sobre tierra y un 66% sobre cuerpos de agua (USGS LP DACC, 2009). Para cubrir al territorio nacional se requieren 6 tiles (unidades en que se originan y distribuyen las imágenes MODIS, ver capítulo I) que se descargaron de la siguiente dirección URL https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data. Se trata de productos MOD11A2 y MYD11A2 (h07v06, h08v05, h08v06, h08v07, h09v06 y h0907). Los datos fueron reproyectados mediante la herramienta MRT MODIS Reprojection Tool que también se puede descargar de la dirección URL antes mencionada (ver capítulo III). La capas geográficas fueron reproyectadas a Cónica Conforme de Lambert y se utilizó el datum NAD27, con los parámetros de proyección SMajor: 0.0, SMinor: 0.0, STDPR1: 17.5, STRP2: 29.5, CentMer: -102.0, OriginLat: 0.0, FE: 2000000.0 y FN:0.0 (Figura 1).

Cada tile contiene 12 archivos de configuración y datos, de los cuales para la investigación presente interesa LST_Day_1km (8-Day daytime 1km grid land surface temperatura). Este archivo contiene los datos de temperatura codificados en enteros de 16 bit sin signo y los valores validos van desde 7500 a 65535 por lo que es necesario multiplicar el archivo por el factor de escala de 0.02 para obtener la temperatura en Kelvin.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta investigación no se tiene la intención de caracterizar la climatología y otras condiciones biofísicas de la zona de estudio considerando todas las condiciones atmosféricas y otras fuentes de variabilidad como lo es la topografía o gradientes latitudinales. Como se mencionó anteriormente se trata de analizar el efecto de la agregación espacial para la mejora de las estimaciones de Ta utilizando LST. En los casos de los niveles de agregación interesantes como los que obtuvieron mejores índices de correlación se mencionan condiciones biofísicas que pudieran explicar los resultados.

No se utilizan datos instantáneos o diarios debido a la alta probabilidad de encontrar inconsistencias en los datos tanto del satélite como en campo. Por ello se prefiere utilizar un producto consistente y menos sujeto a errores como lo es el agregado semanal. Los análisis son exploratorios y se realizan a niveles de agrupación espacial comunes para reportar la información climatológica en México: estados, regiones hidrológicas y País. De esta forma, los resultados pueden ser consistentes con la manera de publicar la información climatológica en México.

Se analizaron tres fechas representativas de la climatología en el país pero de dos años diferentes (2007 y 2008). Se consideran los satélites Terra y Aqua lo que significa que se analizan productos de 12 imágenes diferentes. Considerando lo anterior el planteamiento temporal es adecuado aunque por supuesto perfectible. En cuanto a la utilidad práctica de realizar análisis de información agrupada temporalmente cada ocho días se pueden mencionar muchos casos pero es posible ejemplificar con el cálculo de balances hidrológicos. Este se realiza frecuentemente en forma anual y en ocasiones por mes. El hecho de tener datos de temperatura semanales permite obtener un muy buen estimado de la evapotranspiración que es un componente esencial de los balances hidrológicos mensuales y anuales e incluso posibilita la generación de balances semanales. Adicionalmente los reportes hidrológicos y climáticos se publican como promedios diarios mensuales o anuales. Esta información permite obtener promedios diarios con excelente representatividad temporal.

En los siguientes párrafos se presentan y se analizan los resultados obtenidos agrupados por país, por estado y por región hidrológica considerando los períodos julianos antes descritos. También se reportan los resultados de incluir NDVI como variable predictora adicional.

RESULTADOS A NIVEL PAÍS Y POR ESTADO

La tabla 1 muestra los resultados del análisis de correlación a nivel nacional y estatal entre las variables LST y T_a para la fecha representativa correspondiente a los días julianos 113, 257 y 337 y para los años 2007 y 2008 en el caso del sensor MODIS Terra. Correlaciones estadísticamente no significativas son consideradas en casos de $P > 0.1$ y significativas para $P < 0.1$. y en blanco las significativas ($P < 0.1$). El coeficiente de correlación está indicado por r y N corresponde al número de estaciones.

Tabla 1. Resultados del análisis de correlación a nivel nacional y estatal entre las variables temperatura superficial (LST) proveniente del sensor MODIS Terra (valores del píxel donde está ubicada la estación climática) y temperatura del aire (Ta) medida para la fecha correspondiente de la imagen MODIS en las estaciones meteorológicas. Los análisis se efectuaron agrupando los datos por estado y a nivel nacional para la fecha representativa correspondiente a los días Juliano 113, 257 y 337, para los años 2007 y 2008. Donde "r" es la correlación, "p" es la significancia y "N" es el tamaño de la muestra.

ESTADOS	Día Juliano 113						Día Juliano 257						Día Juliano 337					
	2007		2008		2007		2008		2007		2008		2007		2008			
	r	P	N	r	P	N	r	P	N	r	P	N	r	P	N			
AGS	-0.0073	0.984	7	0.5105	0.196	7	-0.21	0.535	10	0.6609	0.0268	11	-0.3075	0.2466	16	-4.739	0.0637	16
BC	0.6207	0.6168	14	0.3281	0.252	14	-0.12	0.739	10	0.8306	0.0029	10	0.6226	0.0545	10	0.5785	0.0798	10
CAMP	0.1357	0.6227	15	-0.3691	0.176	15	-0.19	0.532	13	-0.023	0.941	13	0.0123	0.9625	16	-0.2592	0.8152	17
CHIH	0.8446	0	25	0.763	1E-05	25	0.6	0.002	25	0.204	0.3281	25	0.8143	1E11	27	0.6606	0.0002	27
CHIS	0.4438	0.0097	33	0.4761	0.004	34	-0.17	0.292	29	0.5961	3E-05	42	0.6019	1E05	48	0.6403	1E-12	48
COACH	0.4704	0.0272	22	0.1765	0.432	22	0.452	0.04	21	0.6898	0.0005	21	0.5769	0.0025	25	0.3042	0.1392	25
COL	0.6143	0.0784	9	0.6405	0.063	9	0.013	0.974	9	0.0275	0.9441	9	0.28	0.4043	11	0.2424	0.4726	11
D.F	-0.1031	0.7468	10	0.8636	0.001	10	0.724	0.167	5	0.2689	0.6617	5	0.1487	0.6278	19	0.3903	0.1873	13
DGO	0.2613	0.1237	34	0.4916	0.003	34	0.568	5E-04	34	0.4165	0.0143	34	0.2759	0.0984	37	0.1693	0.3164	37
GRO	0.1366	0.4967	23	0.5711	0.004	27	0.159	0.458	24	0.2477	0.2431	24	0.6485	0.0003	27	0.638	0.0003	27
GTO	0.1796	0.3094	31	0.0136	0.939	34	0.163	0.408	28	-0.203	0.3006	28	-0.0067	0.9667	41	0.1521	0.3425	41
HGO	0.4473	0.0718	17	0.5913	0.012	17	0.317	0.405	9	-0.415	0.2663	9	0.5176	0.0162	21	0.3082	0.1741	21
JAL	0.0745	0.8488	9	0.3204	0.401	9	0.174	0.438	22	0.3498	0.1106	22	0.323	0.1533	21	0.3423	0.1288	21
MEX	-0.1141	0.6628	15	0.694	0.002	17	0.334	0.289	12	0.2491	0.435	12	0.7054	0.0033	15	0.7549	0.0011	15
MICH	0.4982	0.0008	42	0.4436	0.003	42	0.475	0.086	14	0.2408	0.4069	14	0.3783	0.1485	16	0.4667	0.0684	16
MOR	0.4577	0.4577	5	0.7685	0.129	5	-0.04	0.509	5	0.6196	0.265	5	0.7605	0.4499	3	-0.9437	0.2147	3
NAY	0.6095	0.0814	8	0.3628	0.337	9	0.515	0.296	6	0.1245	0.8142	6	-0.4962	0.2574	7	0.3363	0.4607	7

TABLA 1. CONTINÚA

ESTA-DOS	Día juliano 113						Día juliano 257						Día juliano 337					
	2007		2008		2007		2008		2007		2008		2007		2008			
	r	P	N	r	P	N	r	P	N	r	P	N	r	P	N			
MEX	-0.1141	0.6628	15	0.694	0.002	17	0.334	0.289	12	0.2491	0.435	12	0.7054	0.0033	15	0.7549	0.0011	15
MICH	0.4982	0.0008	42	0.4436	0.003	42	0.475	0.086	14	0.2408	0.4069	14	0.3783	0.1485	16	0.4667	0.0684	16
MOR	0.4577	0.4577	5	0.7685	0.129	5	-0.04	0.509	5	0.6196	0.265	5	0.7605	0.4499	3	-0.9437	0.2147	3
NAY	0.6095	0.0814	8	0.3628	0.337	9	0.515	0.296	6	0.1245	0.8142	6	-0.4962	0.2574	7	0.3363	0.4607	7
NL	0.3012	0.2101	19	0.1575	0.52	19	0.394	0.086	20	0.4831	0.0309	20	0.6388	0.0104	15	0.2253	0.4195	15
OAX	0.1273	0.6511	15	-0.0056	0.984	15	0.129	0.675	13	0.4578	0.1157	13	-0.2459	0.3968	14	0.1505	0.6075	14
PUEB	0.5449	0.0033	35	0.5146	0.002	35	0.67	0.048	9	0.6472	0.0595	9	0.4391	0.0106	33	0.5222	0.0018	33
ORO	1		2	1		2	1	1	2	1		2	0.9245	0.0246	5	0.7725	0.1257	5
OROO	1		2	1		2	1		2	1		2	0.199	0.6416	4	0.7749	0.2251	4
SIN	-0.0246	0.9093	24	0.1967	0.357	24	-0.5	0.017	22	0.1549	0.4914	22	0.2791	0.1353	30	0.1101	0.0886	30
SLP	-0.263	0.3853	11	-0.1523	0.655	13	0.325	4775	7	-0.053	0.9102	7	-0.361	0.1411	18	-0.6373	0.0044	18
SON	0.503	0.0064	28	0.5003	0.007	28	0.511	0.004	30	0.684	3E-05	30	0.4623	0.0152	27	0.5657	0.0017	28
TAB	0.1514	0.5239	20	0.1333	0.575	20	0.163	0.596	13	0.1707	0.5771	13	0.3751	0.0465	19	0.1575	0.5195	19
TAMPS	-0.3452	0.0456	34	0.39	0.023	34	-0.02	0.923	35	0.2115	0.2156	36	0.159	0.4282	27	0.0393	0.8489	26
TLAX	0.7778	0.1214	5	0.2878	0.639	5	-0.51	0.491	4	0.5286	0.4717	4	1		2	1		2
VER	0.593	IE-06	47	0.6209	IE-10	47	0.74	0.023	9	0.8781	0.0018	9	0.5514	3E-05	51	0.6482	IE-06	51
YUC	-0.5013	0.0809	13	0.6666	0.013	13	-0.02	0.949	13	0.6248	0.0224	13	0.6907	0.0015	18	0.4541	0.0583	18
ZAC	-0.162	0.4829	21	0.1881	0.414	21	0.04	0.878	17	0.1509	0.5632	17	0.0781	0.7169	24	0.2063	0.3334	24
NACIONAL	0.32	0	585	0.3154	0	609	0.39	0	462	0.55	0	487	0.4236	0	640	0.4531	0	640

Como puede observarse para todas las fechas analizadas en los años 2007 y 2008 a nivel nacional siempre se observa una correlación significativa que fluctúa entre 0.31 hasta 0.55. Esto indica que las variables LST y T_a están correlacionadas a nivel nacional pero que existen otras variables o factores que afectan en un alto grado la variabilidad de T_a y que no están siendo consideradas mediante la variable LST. Esto es indicador de que debido a la configuración espacial de la ubicación de estaciones (número de estaciones y distancia entre ellas) la agregación espacial a nivel país de las estaciones no es la más adecuada para representar la variabilidad espacial de T_a .

A nivel estatal solo los estados de Puebla, Sonora y Veracruz presentan correlaciones significativas en todos los casos analizados desde alrededor de 0.40 hasta de 0.87 para todos los periodos y años analizados. En el caso de la correlación con $r=0.87$ el intercepto fue de -0.27 y la pendiente de 0.95 indicando una sensibilidad un poco menor a la esperada de T_s a los cambios de LST, lo que puede generar una mínima subestimación de T_s . El hecho de que estos estados presenten tales correlaciones es notable debido a se trata de lugares con condiciones significativamente diferentes (nubosidad, tipo y estados de la vegetación, humedad de la superficie, velocidad del viento y la humedad relativa). El caso de Veracruz es un estado que podría ser caracterizado como representativo del trópico húmedo, Puebla del altiplano central con lluvias de nivel medio y Sonora un estado con pocas lluvias del noreste del país. Este resultado puede indicarnos que las condiciones anteriormente mencionadas no necesariamente son definitorias para la coincidencia entre las variables T_a y LST.

Día juliano 113

Para el caso del periodo de ocho días correspondiente al día juliano 113 solo 10 estados presentan correlaciones significativas para ambos años y ocho presentan para un año correlaciones significativas y para otro no. Como tendencia general se observa que los estados con menos estaciones meteorológicas tienden a tener correlaciones no significativas. El estado que presenta las mayores correlaciones significativas para ambos años analizados es Chihuahua con 0.84 para 2007 y 0.76 para 2008. Solo en este caso podría considerarse que LST es un buen indicador de T_a y que puede generarse una ecuación funcional. Para la mejor correlación de Chihuahua 2007 con $r=0.84$ el intercepto fue de 13.14 y la pendiente de 0.95, indicando nuevamente que existe una correlación alta y una sensibilidad un poco

menor a la esperada de T_s a los cambios de LST, lo que puede generar una mínima subestimación de T_s . En el caso de los demás estados restantes con correlación significativa se observan coeficientes de correlación de alrededor de 0.4 a 0.6 indicando que LST es responsable en buena medida de la variabilidad de T_a , pero que el nivel de correlación no es suficiente a nivel estatal o nacional para generar un modelo para obtener T_a a partir de LST.

DÍA JULIANO 257

Este es el periodo que presenta la mayor cantidad de casos de correlaciones no significativas (solo 5 estados con correlaciones significativas). Esto es entendible debido a que se trata del periodo correspondiente al verano que en México se caracteriza por ser el de mayor concentración de lluvias y nubosidad lo que influye en la calidad de LST debido a la limitación inherente a los productos de percepción remota basados en bandas infrarrojas termales tal como lo indica Wan (2008). En este caso, los valores de LST están muy cercanos a los valores de T_a para los estados de Veracruz y Puebla con coeficientes de correlación superiores a 0.65 y solo en estos casos es posible la obtención de un modelo funcional. En el caso de la mejor correlación (Chihuahua, en 2007, $r=0.87$) el intercepto fue de -4.71 y la pendiente de 1.04, indicando que existe una correlación alta y una ligera sensibilidad de T_s respecto a los cambios de LST que puede llevar a una ligera sobreestimación de T_s .

Día juliano 337

En el caso del periodo correspondiente al día 337 hay 14 estados que presentan correlaciones significativas para ambos años y cinco presentan para un año correlaciones significativas y para otro no. Similarmente que para el día juliano 113, el estado que presenta las mayores correlaciones significativas para ambos años analizados es Chihuahua con 0.81 para 2007 y 0.66 para 2008. Esta observación apoya la afirmación de que para este estado LST es un buen indicador de T_a y que puede generarse una ecuación útil. En la mayoría de los estados restantes con correlación significativa se observan coeficientes de correlación de alrededor de 0.4 a 0.6 confirmando para estos estados que LST está asociado a T_a , pero que el nivel de correlación no es suficiente a nivel estatal o nacional para generar modelos de estimación de T_a . La mejor correlación fue para Chihuahua en el 2007 con $r=0.81$

el intercepto fue de 4.68 y la pendiente de 0.96, indicando que existe una correlación alta con la posibilidad de una mínima subestimación de T_s .

RESULTADOS AL AGRUPAR ESTACIONES POR REGIONES HIDROLÓGICAS

En la tabla 2 se muestran los resultados de análisis de correlación entre T_a de estaciones agregadas por región hidrológica y LST proveniente de MODIS Terra y Aqua. Como se mencionó en el apartado sobre metodología se eligieron regiones que corresponden a las condiciones más representativas del país (una en el norte semi-árido: RH09 Sonora Sur, otra en la meseta alta del centro: RH12 Lerma-Chapala y la última en el trópico húmedo: RH30 Grijalva-Usumacita).

Con respecto a los valores a nivel nacional obtenidos para el sensor Terra (última hilera de la tabla 1) es posible observar que la agregación por regiones hidrológicas mejora la correlación entre las variables. La región que obtuvo las mejores correlaciones es la región hidrológica 9 (RH 9) con coeficientes de correlación superiores a 0.70 para ambos sensores y para los años analizados (ver figura 2). En el caso de la mejor correlación con $r=0.85$ el intercepto fue de -1.27 y la pendiente de 0.95, indicando que existe una correlación alta con posibilidades de una mínima subestimación de T_s cuando LST aumenta. Esto podría ser consistente con lo esperado debido a que siendo una región semiárida (con características específicas en cuanto a tipo y estados de la vegetación, humedad de la superficie y la humedad relativa) las condiciones de nubosidad no son muy frecuentes y por ello no se obstaculiza la capacidad del sensor infrarrojo térmico para obtener un valor de LST cercano a T_a . El mejor valor de correlación se obtuvo para esta región el día 257 en 2008 con el sensor Aqua. La región 12 obtuvo valores medios de correlación semejantes a los obtenidos para todo el país (Tabla 2). Esta región es la Lerma-Chapala y su gran heterogeneidad en cuanto a climas, regiones altitudinales y coberturas terrestres puede ser responsable de estos niveles de correlación. La región 30 es la que presenta las mayores fluctuaciones del coeficiente de correlación llegando a valores muy bajos de menos de 0.1 hasta un caso de 0.79. Esta región es la correspondiente a la cuenca Grijalva-Usumacinta. Llama la atención que siendo una región muy lluviosa y por tanto con alta presencia de nubosidad sea posible obtener niveles de correlación medios y altos. Esta situación también se observó para el estado de Veracruz, el cual no obstante presentar altos niveles de precipitación obtuvo siempre correlaciones significativas y en ocasiones tan altas como 0.87 para el día juliano 257 en 2008 (ver tabla 1). En el caso de la mejor

TABLA 2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE T_a DE ESTACIONES AGREGADAS POR REGIÓN HIDROLÓGICA Y LST PROVENIENTE DE MODIS TERRA Y AQUA, PARA LOS DÍAS JULIANOS 113, 257 Y 337 EN LOS AÑOS 2007 Y 2008.

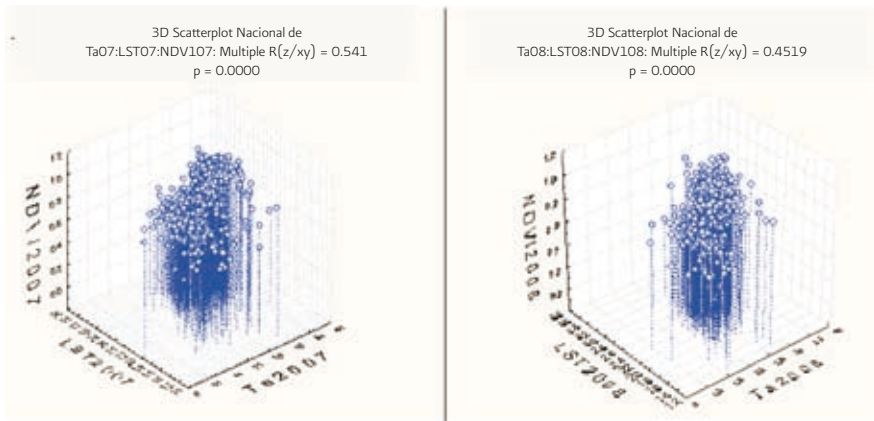
RH	Modis Terra		Modis Aqua		Modis Terra		Modis Aqua		Modis Terra		Modis Aqua	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
9	0.7333	0.7327	0.7381	0.7267	0.5814	0.8393	0.7093	0.8555	0.796	0.8546	0.6846	0.7896
12	0.1939	0.3431	0.3087	0.4269	0.2182	0.2362	0.3059	0.3749	0.3022	0.3181	0.4744	0.4138
30	0.5189	0.5528	0.4522	0.5542	0.794	0.4083	-0.0836	0.2566	0.6156	0.5551	0.4183	0.5121

correlación para RH 30 fue en el 2007 con $r=0.79$ el intercepto fue de 6.41 y la pendiente de 0.61, indicando que existe una correlación alta y una sensibilidad sensiblemente menor a la esperada de T_s respecto a los cambios de LST provocando una subestimación de T_s .

RESULTADOS A NIVEL NACIONAL CON T_a , LST Y NDVI

En la figura 3 se presentan los resultados del análisis de correlación multivariada del periodo correspondiente al día juliano 337 para los años 2007 y 2008 entre las variables temperatura del aire (T_a) como variable dependiente y como independientes o predictoras temperatura superficial (LST) e índice normalizado de vegetación (NDVI) provenientes del sensor MODIS Terra para todas las estaciones climatológicas del país. Para 2007 se aprecia un incremento de la correlación entre las variables con respecto al mismo análisis sin considerar NDVI (r de 0.42 a 0.54), coincidiendo en este caso con lo encontrado por Kawashima et al. (2000). Para 2008 se obtuvo un r de 0.4519 comparado con r de 0.45 para el caso que no considera NDVI. Esto indica que la inclusión de NDVI no influyó para modificar la correlación entre las variables comparadas.

FIGURA 3. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN PARA EL PERIODO CORRESPONDIENTE AL DÍA JULIANO 337 ENTRE LAS VARIABLES TEMPERATURA DEL AIRE (T_a) COMO VARIABLE DEPENDIENTE Y TEMPERATURA SUPERFICIAL (LST) E ÍNDICE NORMALIZADO DE VEGETACIÓN (NDVI) PROVENIENTES DEL SENSOR MODIS TERRA PARA TODAS LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DEL PAÍS. IZQUIERDA: 2007, DERECHA: 2008.



RESULTADOS AL AGRUPAR ESTACIONES POR REGIONES HIDROLÓGICAS INCLUYENDO NDVI

Para investigar el efecto de incluir NDVI en los análisis de correlación entre Ta y LST (MODIS Terra) a nivel de regiones hidrológicas se realizaron análisis de correlación multivariada entre estas variables para el periodo 337 (que obtuvo la mayor r en el análisis Ta vs LST) del 2007 y 2008. La mayor parte de los modelos de correlación obtenidos fueron no significantes lo que indica que esta variable no necesariamente mejora la correlación entre Ta y LST a nivel de regiones hidrológicas (Tabla 3).

CONCLUSIONES

En este estudio se analiza la viabilidad de generar modelos de estimación de Ta utilizando productos LST de MODIS (MOD11A2.V5 y MYD11A2.V5) a diferentes niveles de agregación espacial. Se observó que LST y Ta están correlacionadas a nivel nacional pero que existen otras variables o factores que afectan en un alto grado la variabilidad de Ta. Este hecho es indicador de que debido a la configuración espacial de la ubicación de estaciones (número de estaciones y distancia entre ellas) la agregación espacial a nivel país de las estaciones no es la más adecuada para representar la variabilidad espacial de Ta.

A nivel estatal solo los estados de Puebla, Sonora y Veracruz presentan correlaciones significativas medianas (de alrededor de 0.4) a altas (de hasta 0.88) para todos los periodos y años analizados. Así se pudo observar que con algunas excepciones la agregación de estaciones climáticas por estado y a nivel nacional no es suficiente para la generación de modelos robustos de estimación de Ta usando LST. Chihuahua es un estado para el que LST resultó como un buen indicador de Ta ya pudieron generarse modelos con buenos resultados especialmente para las condiciones de primavera e invierno. Al realizar el análisis agregando por regiones hidrológicas se mejora la correlación entre las variables. Sin embargo solo en el caso de la región hidrológica 9 es posible pensar en un modelo funcional. Por tanto es necesario investigar otros factores de tipo atmosférico, estacional y geográfico como lo sugiere Jones Jr. et al. (2004) y/o incursionar en análisis de otras variables relacionadas como tipo de cobertura terrestre o fracción de vegetación como lo efectúan Mostovoy et al. (2006).

A nivel general mientras mayor sea la agrupación de estaciones (incrementando n en los modelos de correlación) se observan correlaciones mayores y con ma-

Tabla 3. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CORRELACIÓN MULTIVARIADO PARA T_a DE ESTACIONES AGREGADAS POR REGIÓN HIDROLÓGICA COMO VARIABLE DEPENDIENTE, Y COMO DEPENDIENTES O PREDICTORAS LST E ÍNDICE NORMALIZADO DE VEGETACIÓN NDVI PROVENIENTE DE MODIS TERRA Y AQUA, PARA LOS DÍAS JULIANOS 113, 257 Y 337 EN LOS AÑOS 2007 Y 2008.

Periodo	RH	Modis Terra				Modis Aqua			
		$r (T_a/LST)$		$r (T_a/LST, NDVI)$		$r (T_a/LST)$		$r (T_a/LST, NDVI)$	
		2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
113	9	0.7333	0.7327	0.6589	0.6118	0.7381	0.7267	0.6551	0.6023
113	12	0.1939	0.3431	0.0348	0.6118	0.3087	0.4269	0.2997	0.2949
113	30	0.5189	0.5528	0.2392	0.254	0.4522	0.5542	0.703	0.8401
257	9	0.5814	0.8393	0.6017	0.7806	0.7093	0.8555	0.5793	0.4708
257	12	0.2182	0.2362	0.2837	0.5216	0.3059	0.3749	0.4427	0.185
257	30	0.794	0.4083	0.5183	0.3962	-0.0836	0.2566	0.2558	0.2767
337	9	0.796	0.8546	0.2852	0.5562	0.6846	0.7896	0.2078	0.4299
337	12	0.03022	0.3181	0.3243	0.3641	0.4744	0.4138	0.3626	0.2309
337	30	0.6156	0.5551	0.3184	0.2202	0.4183	0.5121	0.6945	0.6606

por significancia estadística. Lo que puede interpretarse como un indicativo de la insuficiencia de las estaciones terrestres para medir la variable de interés (T_a) con un cubrimiento adecuado del territorio nacional. Otro punto que se pudo detectar es que no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos con el sensor Terra y los del sensor Aqua.

La inclusión de NDVI como otra variable independiente no necesariamente mejora la correlación entre las variables comparadas. En todo caso es necesario realizar más investigaciones para incluir esta variable en la generación de modelos de estimación de T_a utilizando LST.

REFERENCIAS

- CONAGUA. 2008, Glosario integrado para las estadísticas del agua en México. Edición 2008. Disponible en: <http://www.cna.gob.mx/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=06f346cf-d0b2-4c2b-8cd0-a1f9a99256ce%7CSISTEMA%20NACIONAL%20DE%20INFORMACI%C3%93N%20DEL%20AGUA%7C10%7C0%7C0%7C0%7C0>. Último acceso 05 de abril del 2010.
- Daly, C. 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *Int. J. Climatol.* 26: 707–721. Published online 27 March 2006 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/joc.1322.
- Downie, N.M. y Heath, R.W. 1973. *Métodos estadísticos aplicados*, Harla S.A de C.V. pp 100-116.
- Jones Jr., P.R., Jedlovec, G.J., Suggs, R.J. y Haines, S.L. 2004. Using MODIS LST to Estimate Minimum Air Temperatures at Night. 13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Available at: http://ams.confex.com/ams/13SATMET/techprogram/paper_79017.htm Último acceso 02/05/2009.
- Kawashima, S., Tomoyuki I., Mitsuo M. y Tetsuhisa M., 2000. Relations between Surface Temperature and Air Temperature on a Local Scale during Winter Nights. *Journal of Applied Meteorology*, 39, 1570–1579.
- Mao, K. B., Tang, H. J. , Wang, X. F. , Zhou, Q. B. y Wang, D. L. 2008. Near-surface air temperature estimation from ASTER data based on neural network algorithm', *International Journal of Remote Sensing*, 29: 20, 6021-6028.
- Mostovoy, G.V., King, R.L., Reddy, K.R., Kakani, V.G. y Filippova, M.G. 2006. Statistical Estimation of Daily Maximum and Minimum Air Temperatures from MODIS LST Data over the State of Mississippi. *GIScience & Remote Sensing*, 43-1:78-110.
- Pielke, R.A., Stohlgren, T., Parton, W., Doesken, N., Money, J., Schell, L. Redmond, K.

2000. Spatial representativeness of temperature Measurements from a single Site. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 81-4:826-830.
- USGS LP DAAC. 2009. Land processes active archive center. Data set name: Land surface temperature & emissivity 8-Day L3 Global 1Km. ultimo acceso en 03/05/2009 disponible en https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table/land_surface_temperature_emissivity/8_day_l3_global_1km/v5/terra Ultimo acceso 03/05/2009.
- Wan, Z. 2008. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of Environment* 112: 59–74. doi:10.1016/j.rse.2006.06.026.
- Wang, W., Liang, S. y Meyers, T., 2008. Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements. *Remote Sensing of Environment* 112-3: 623-635, doi:10.1016/j.rse.2007.05.024.
- WMO, (World Meteorological Organization). 2006. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Preliminary seventh edition. WMO-No.8. Geneva. Suiza.
- Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T. y Connor, S.J., 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems in Africa. *Remote Sensing of Environment* 114: 449–465.
- Prihodko, L. y Goward, S.N., 1997. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment* 60: 335-346.
- Berk, A., Bernstein, L.S. y Robertson, D.C.. 1987. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN (Burlington, MA: Spectral Science), Rep. AFGL-TR-87-0220.

CAPÍTULO 11

Evaluación de la cobertura vegetal en México: aciertos y sesgos del mapa derivado del sensor MODIS

Stéphane Couturier

RESUMEN

Varios productos derivados del sensor MODIS sirven para la modelación global de la cobertura vegetal y como insumos para el monitoreo regional de procesos de modificación del ambiente, como es el caso hoy de México. Para conocer la calidad y mejorar la calibración de estos productos, la evaluación estadística de su confiabilidad es primordial, sobre todo para establecer márgenes de error en los análisis nacionales sobre la modificación del ambiente.

Un primer objetivo de este capítulo es dar a conocer métodos de evaluación de la cartografía en México que buscan la sinergia entre bases de datos existentes, lo que reduce drásticamente el obstáculo del costo de la evaluación. El segundo objetivo del capítulo es realizar la evaluación estadística, por primera vez en México, de un producto cartográfico a escala nacional. Se trata de la evaluación de MOD12Q1, producto cartográfico de cobertura vegetal derivado del sensor MODIS.

El método de la evaluación contempla un enfoque difuso, combinando la información de terreno del muestreo nacional sistemático del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) y la cartografía 1:250,000 de cobertura vegetal del INEGI. Con las opciones optimistas de la evaluación, la confiabilidad del producto MOD12Q1 asciende a 65% (+-1%) y MODIS detecta correctamente 73% de la clase 'bosque'. Las zonas de mayor confusión se registran en selvas bajas caducifó-

lias, clasificadas como bosque perenne, y en bosques de encino, clasificados como pastizal. Se infiere que la metodología descrita podría servir a evaluar la cartografía actual de la SEMARNAT.

INTRODUCCIÓN

Importancia de la validación de mapas derivados de imágenes

La cartografía de cobertura vegetal es un insumo científico útil para estudiar la evolución del patrón paisajístico en el tiempo y espacio. El proceso de clasificación de imágenes de satélite, que se ha vuelto desde los años 1990 una base de la producción cartográfica, demostró ser altamente eficaz a escala regional por sus calidades sinópticas. Sin embargo, este proceso está afectado por errores de distintos tipos (Green y Hartley, 2000), asociados en parte con las limitaciones de resolución espectral y espacial de las imágenes de satélite frente a la precisión de la leyenda temática del mapa, mismos errores que afectan significativamente la calidad de esta cartografía; ver por ejemplo en el hemisferio norte del continente americano, Stehman et al. (2003), Rempel et al. (2005), Couturier (2007). Por lo tanto, la evaluación de la cartografía, que consiste en conocer su grado de confiabilidad, es crucial al momento de presentar o utilizar productos derivados de la misma –por ejemplo unas estadísticas de superficie, una tasa de deforestación o de cambio de uso de suelo, un mapa de Índice de Área Foliar– sin lo cual el resultado carece de margen de error y, por lo tanto, de validez estadística.

El cambio de la cobertura vegetal en zonas de alta biodiversidad es un tema que puede suscitar polémicas de orden nacional en países ubicados en estas zonas. Sin embargo, la gran mayoría de la información cartográfica se obtiene a través de las agencias gubernamentales, las cuales, si es que mencionan la calidad de su cartografía, la reducen típicamente a un señalamiento de la resolución de la imagen (tamaño del pixel) y/o de su temporalidad. Así, las agencias dejan la impresión engañosa que son despreciables los errores asociados a la calidad radiométrica de la imagen, o a limitaciones en el algoritmo de generación del producto cartográfico.

En realidad, salvo dos excepciones de evaluación parcial del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000 (Mas et al., 2002; Couturier, 2007), los mapas del Instituto Nacional de Estadísticas, Geografía e Informática (INEGI) y de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en México carecen hasta la fecha de información estadística sobre su confiabilidad. Esto significa

que las instancias federales en México publican, acerca de sus datos cartográficos, cifras oficiales sin una evaluación de su margen de error, entonces sin validez estadística. A su favor, se reconoce que esta situación es desgraciadamente el caso de la gran mayoría de las agencias gubernamentales en las zonas de alta biodiversidad (Couturier y Mas, 2009), y se reconoce también que el ejercicio de evaluación cartográfica implica un trabajo y costo adicional con respecto al trabajo de producción cartográfica. Un objetivo del presente trabajo será evidenciar pistas metodológicas y técnicas de especialmente bajo costo que por lo tanto buscan aminorar el obstáculo del costo.

Desde el año 2003, la cartografía de cobertura vegetal se adquiere a escala nacional (1:250,000) desde el servidor de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), dependencia de la SEMARNAT. La cartografía está actualizada a partir de un acervo de datos (ver CONAFOR, 2008) que comprende series temporales de imágenes del satélite MODIS (y los índices de vegetación derivados) y cartografía de referencia (INEGI serie III del año 2003). Para ilustrar lo anteriormente dicho, la única mención de la calidad de la cartografía, en el servidor de la CONAFOR, está incluida en esta frase: *'La CONAFOR le recuerda que las imágenes solo pueden ser precisas de acuerdo a la fecha en las que fueron tomadas y no incluyen los cambios subsecuentes'* (CONAFOR, 2008). No hay mención alguna, en las especificaciones técnicas, sobre la confiabilidad, por ejemplo, del proceso de generación de los productos derivados, ni de un insumo clave del producto anual de tasa de deforestación/ cambio de cobertura, que es la carta de la serie III del INEGI utilizada como referencia. Cabe mencionar que el tener a disposición del usuario la imagen de satélite vía internet, no hace que un producto cartográfico derivado de esta imagen sea confiable; la obtención, desde los tonos de la imagen, de clases temáticas puede no resultar trivial y le sería imposible a un usuario evaluar la calidad global de la cartografía proporcionada, accediendo visualmente a las imágenes por internet.

Evaluación de la cartografía regional y global de cobertura vegetal

Solamente desde los años 2000, se han publicado en el mundo las primeras estimaciones estadísticamente válidas sobre la confiabilidad de cartografía regional de Cobertura Vegetal y Usos de Suelo (CVUS). Laba et al. (2002) y Wickham et al. (2004), presentan la evaluación de varios mapas de 1992 en Estados Unidos de América (EUA), las cuales contienen típicamente 20 a 30 categorías temáticas

(o clases) con un mínimo cartografiable de 30 m (pixel Landsat). Estos estudios resaltan la presencia de numerosas confusiones entre clases, que resultan en un porcentaje de confiabilidad global del mapa (porcentaje de área en donde el mapa presenta una información correcta) de entre 38 y 70%. Por lo tanto, los estudios de evaluación constituyen una valiosa información para el uso de los mapas y para inducir estrategias de mejoramiento de la futura cartografía.

Los sensores de observación global como AVHRR, SPOT-VEGETATION y MODIS proveen mapas de cobertura vegetal caracterizados por un mínimo cartografiable mucho menos preciso (1km), y por la descripción de usualmente entre 11 y 21 clases temáticas. Una función esencial de estos productos es caracterizar la distribución global de la cobertura vegetal, para uso en modelos de vegetación y de ciclo de carbono. Mayaux et al. (2006) iniciaron la evaluación del mapa Global Land Cover 2000 derivado de SPOT-VEGETATION, y reportaron una confiabilidad de 68.6% en bloques geográficos relativamente homogéneos de Eurasia del norte.

Varios productos derivados del sensor MODIS probaron su utilidad en el estudio y modelación global de la cobertura vegetal y están utilizados como insumo para el monitoreo regional de procesos de modificación del ambiente (ver capítulo IV). Algunos de ellos utilizan el mapa de cobertura vegetal (producto MOD12Q1), derivado de una clasificación empírica supervisada de bandas del sensor MODIS (Huete et al., 2002). El equipo científico del sensor MODIS realizó una evaluación ('validación cruzada') de MOD12Q1 en la red de los sitios de entrenamiento/verificación STEP ('System for Terrestrial Ecosystem Parametrization') del clasificador, y encontró una confiabilidad global de 71% (Friedl et al., 2002). Por otra parte se hizo una evaluación de MOD12Q1 en cuatro sitios de una zona templada de Norteamérica (sitios 'Big Foot': Cohen et al., 2003). Todos los estudios de evaluación citados están basados en una cartografía más precisa, derivada en general de la interpretación de imágenes de Landsat y con información auxiliar de campo.

Sin embargo, todos los estudios citados consideran sitios relativamente homogéneos en término temático (por ejemplo, un sitio STEP es homogéneo por diseño), en donde la confiabilidad de un producto global como MOD12Q1 tiene un sesgo optimista (Jung et al., 2006, Mayaux et al., 2006). Además, la limitación más fuerte del algoritmo empírico de clasificación de MODIS es su dependencia en los sitios de entrenamiento (Jung et al., 2006). Por lo tanto, para seguir mejorando su calibración, MOD12Q1 necesita y beneficia de esfuerzos regionales de estimación de su confiabilidad en regiones del mundo con condiciones fisiográficas específicas y con una cobertura vegetal heterogénea.

El objetivo central de este capítulo es dar a conocer una evaluación estadística de confiabilidad a nivel nacional, por primera vez en los Estados Unidos Mexicanos, de un producto cartográfico derivado del sensor MODIS. Un objetivo específico es dar a conocer la magnitud de los aciertos y sesgos de una cartografía derivada de MODIS en cuanto a tipos de cobertura, con énfasis en tipos de bosque. Otro objetivo específico es propiciar pistas, con el método propuesto, para un diseño poco costoso de la evaluación de la cartografía actual de la SEMARNAT, también derivada del sensor MODIS. Para estos fines se evaluó el producto MOD12Q1 en el territorio de México cubierto por vegetación y sin uso agropecuario (aprox. un millón de km²). Para tal evaluación utilizamos el acervo geo-referenciado del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) en México basado en una campaña extensiva de visitas a campo (CONAFOR, 2008), y la cartografía a 1:250,000 del INEGI del año 2003 (Serie III), derivada de la interpretación de imágenes Landsat. Se utilizó un método de evaluación con enfoque difuso que permite construir sitios de referencia comparables con el producto MODIS, combinando la información de terreno de la CONAFOR y la cartografía de cobertura vegetal del INEGI.

Se presentan en la sección 2 los principios de una evaluación de confiabilidad, tal como está practicada en la actualidad, de una cartografía regional y global. En la sección 3, se hace un resumen del método de evaluación aplicado para el producto MOD12Q1, y de los insumos para la zona en evaluación. La sección 4 describe los resultados, globales y por clase, de la evaluación de confiabilidad y discute los resultados con respecto a otros estudios de evaluación del mismo producto. El primer objetivo específico del capítulo está relacionado con la calidad de la información de la cobertura arbolada global que se puede obtener con MOD12Q1. El tipo de hoja (latifoliada o conífera), y la estacionalidad del dosel (deciduo o perenne) son propiedades estructurales y funcionales de los ecosistemas que resultan cruciales para la parametrización de un modelo de vegetación (Jung et al., 2006). El análisis de los resultados puso entonces énfasis en la capacidad de detección, por MOD12Q1, de la dominancia latifoliada / conífera de la cobertura arbolada en México así como de la caducidad o perennidad de los bosques.

La sección 5 da una síntesis de los resultados. Se derivan recomendaciones acerca de la cartografía actual en México y estrategias para su evaluación.

FUNDAMENTOS DE UNA EVALUACIÓN DE MAPA

Como MODIS genera productos a escala global, el equipo científico de MODIS no se puede encargar por sí solo de la validación de su producto, y aprovecha de estudios regionales basados en mapas más precisos e información auxiliar; está comúnmente reconocido que la información auxiliar, aunque no exhaustiva por razones de costos, realza la credibilidad del mapa derivado de imágenes, ya que éste también está sometido a un patrón de errores (Friedl et al., 2002, Cohen et al., 2003, Mayaux et al., 2006).

Stehman y Czaplewski (1998) distinguen dos niveles de evaluación cuantitativa. Primero, una evaluación cuantitativa parcial (enfocada en un área parcial del mapa, e.g. campo de validación), comúnmente empleada en las geo-ciencias para, por ejemplo, validar un método de clasificación automática en una imagen de satélite (ej. validación de MOD12Q1 por Friedl et al., 2002). Así, por la necesidad de corroborar su confiabilidad temática, la validación del producto global está restringida a una zona de especial interés o considerada representativa de biomas (ej. Cohen et al., 2003, Kalacska et al., 2008). Segundo, una evaluación estadísticamente exhaustiva, es decir basada en un diseño de muestreo probabilístico (Stehman, 2001) asociado a todo el área del mapa. La característica fundamental de un muestreo probabilístico es que para cada punto del área, la probabilidad de estar incluido en la muestra de verificación debe ser superior a cero (se dice que su *probabilidad de inclusión* debe estar superior a cero). La evaluación con diseño probabilístico está recomendada por los autores, y luego ampliamente reconocida, como la única con validez estadística en materia de medición de confiabilidad de un mapa. A escala regional, la evaluación es mucho más difícil que a escala local por las restricciones presupuestales y la distribución de numerosas clases en una porción extensa del territorio. Por lo tanto, solamente recientemente se han construido y aplicado métodos comprensivos de evaluación de confiabilidad de cartografía a escala regional o continental en EUA (Zhu et al., 2000, Laba et al., 2002, Stehman et al., 2003, Wickham et al., 2004), en Europa (Büttner y Maucha, 2006), en Canadá (Wulder et al., 2007), en México (Couturier et al., 2008), en Asia del Sur y Sureste (Stibig et al., 2007), y en Eurasia del norte (Mayaux et al., 2006). La confiabilidad está medida por medio de un muestreo de sitios de referencia en el área del mapa, mismos que sirven para verificar el contenido del mapa. El diseño de la evaluación se construye en 3 fases (Stehman y Czaplewski, 1998):

1. Selección representativa de los sitios de referencia (*el diseño de muestreo*)
2. Clasificación confiable de los sitios de referencia (*el diseño de verificación*)
3. Comparación de la información del mapa con la del sitio de referencia (*la síntesis de la evaluación*)

En todos los estudios arriba citados, los sitios de referencia se clasificaron con base en imágenes más precisas (es decir con resolución más fina) que las imágenes que sirvieron para elaborar el mapa. Esto ocasiona discrepancias de escala para compararlos con el mapa. Por ejemplo, todos los mapas excepto los dos en el continente asiático, fueron elaborados a partir de imágenes Landsat (resolución de 30 metros), y evaluados a partir de fotografías aéreas (resolución más fina que 3 metros) o videografía aérea (Canadá). El mapa de Eurasia y el mapa de Asia del Sur y Sureste son partes del producto global GLC2000, elaborado a partir de imágenes del sensor SPOT- VEGETATION (resolución de 1km, comparable con MODIS) y evaluado a partir de imágenes Landsat.

Por otra parte, la asignación de una sola clase al sitio de referencia puede resultar subjetiva y sesgar la evaluación de manera pesimista, especialmente cuando el sitio está caracterizado por una cobertura vegetal heterogénea. En efecto, el sitio puede estar localizado en una zona de transición espacial entre dos clases del mapa (por ejemplo, una zona transitoria de bosque entre las clases bosque de pino y bosque de pino-encino) o en un área fragmentada donde se encuentran presentes varias clases. Una transición temporal entre clases puede estar ocurriendo (por ejemplo, la vegetación secundaria es una transición entre dos tipos de vegetación, caso particularmente frecuente en la zona sub-tropical).

Para enfrentar estos retos de evaluación (discrepancia de escalas y carácter difuso del paisaje), varios autores caracterizan el sitio de referencia a dos escalas (ej. Stehman et al., 2003), otros utilizan una caracterización difusa del sitio, asignando grados de pertenencia a varias clases (ej. Laba et al., 2002, Jung et al., 2006 para el producto global de MODIS). En el método descrito aquí se consideró un enfoque difuso que integra los aspectos de posición y los aspectos temáticos (ver Couturier et al., 2009), incorporando tres escenarios de verificación, cada uno con un grado diferente de tolerancia.

La síntesis de la evaluación (tercera fase de la evaluación) es una recopilación de las coincidencias y discrepancias entre la información contenida en el mapa y la información de referencia. Esta síntesis se hace a través de una matriz con 2 entradas (mapa y datos de referencia), a la cual se refiere, en la literatura, como matriz

de error o matriz de confusión. Esta recopilación, una vez completada, permite obtener el porcentaje de aciertos del mapa (porcentaje de área total en donde el mapa presenta una información correcta), o *índice global* de confiabilidad. La evaluación en los estudios arriba citados contempla, además de la confiabilidad global, la confiabilidad de la porción del mapa ocupada por cierta(s) clase(s), lo que tiene gran relevancia si el uso del mapa está orientado a estimaciones de biodiversidad, de biomasa, o de modificación del ambiente.

DATOS Y ALGORITMO DE EVALUACIÓN

Preparación de los datos MOD12Q1, INFyS e INEGI Serie III

El producto de cobertura vegetal global MOD12Q1 está generado a partir del algoritmo de clasificación MLCCA ('Modis Land Cover Classification Algorithm'), detallado en Friedl et al. (2002). El algoritmo está basado en una clasificación supervisada obtenida con árboles de decisión (ver capítulo II de este libro), sobre siete bandas MODIS y el índice de vegetación EVI ('Enhanced Vegetation Index') derivado de ellas (Huete et al., 2002), en una red global de sitios de entrenamiento (base de datos STEP). Los árboles de decisión sirven para determinar la probabilidad que tiene cada clase en pertenecer a un pixel. Un conocimiento previo está incorporado en el proceso de clasificación, en forma de probabilidades previas de presencia de cada clase, de acuerdo a cartografía regional, y estadísticas de distribución de clases en los sitios de entrenamiento. El resultado de la clasificación está combinado con las probabilidades previas para generar el resultado definitivo. El conocimiento previo solamente es decisivo si la firma espectral del pixel es ambigua. El producto MOD12Q1 incluye un mapa con la clase que obtiene la segunda probabilidad más alta (MOD12Q1 de etiquetas secundarias), lo que permite ofrecer una información de cobertura reconociendo la heterogeneidad a dentro del pixel MODIS.

Para la evaluación de MOD12Q1 en el territorio mexicano, se utilizaron el INFyS de CONAFOR y las cartas del INEGI Serie III. El INFyS consiste en un muestreo sistemático (espacialmente exhaustivo) nacional de sitios de referencia en la totalidad de la cobertura vegetal (sin uso agropecuario) de México (ver CONAFOR, 2008). Los sitios de visita consisten en un conglomerado de cuatro parcelas circunscritas en un círculo de aprox. 112m de diámetro (configuración similar a la del Gap Analysis Project en EUA, ver Laba et al., 2002). Se proyecta una visita de campo a estos sitios con la periodicidad de 5 años. Este trabajo utiliza información

procedente del primer periodo cerrado de visitas que fue de 2004 a 2007 (los sitios visitados totalizan 24,659 en el país, ver INEGI, 2007). La cartografía del INEGI Serie III se elaboró con base en la interpretación visual a escala 1:125 000 de imágenes satelitales Landsat del año 2002, con el respaldo temático de cartas anteriores del INEGI (Serie I y II). El INFyS y la Serie III comparten la proyección y el sistema de clasificación de la vegetación del INEGI. Se obtuvo la información de la cobertura vegetal dominante en los sitios del INFyS desde la CONAFOR y la cartografía nacional Serie III desde el INEGI. El producto global MODIS está dividido en tejas ('tiles') de la reja global sinusoidal ISIN ('Integerized SINusoidal projection'). Las seis tejas que cubren el territorio mexicano se adquirieron desde el sitio MODIS (MODIS, 2001) y se remuestrearon en la proyección Lambert Cónica del INEGI. La cobertura del producto MOD12Q1 versión 4 era disponible solamente en los años 2003 y 2004 para México (MODIS, 2001).

Se procedió a una primera agregación (conversión de leyenda) del atributo de los sitios INFyS a una leyenda simplificada, presentada en la tabla 1. Esta leyenda agrupa clases menos detalladas y más manejables que la leyenda inicial del INEGI (642 clases) en comparación con la precisión taxonómica de la cobertura vegetal clasificada por MODIS. Las clases de cobertura vegetal de la tabla 1 incluyen sus homólogas con vegetación secundaria; por ejemplo en la clase 'Bosques de coníferas' están incluidos los bosques de coníferas con o sin vegetación secundaria. En la primera columna se sitúan las clases con respecto al sistema de clasificación del mapa del Inventario Forestal Nacional del año 2000 (Palacio et al., 2000).

TABLA 1. EXTENSIÓN NACIONAL DE LAS CLASES DE COBERTURA VEGETAL SELECCIONADAS PARA ESTE ESTUDIO

Código Tipo IFN 2000	Nombre de la clase	Nivel formación	Porcentaje del área total	Área por clase (km ²)
400	Bosques de coníferas	Bosque templado	2.7	27,141
500	Bosque de pino-encino		4.2	42,712
500	Bosque de encino-pino		2.7	27,362
600	Bosque de encino		6.6	66,612
700	Bosque mesófilo de montaña	Bosque tropical	0.9	9,475

TABLA 1. CONTINÚA

Código Tipo IFN 2000	Nombre de la clase	Nivel formación	Porcentaje del área total	Área por clase (km ²)
800	Selvas perennifolias		1.9	19,501
800	Selvas sub-perennifolias		3.3	32,879
800	Selvas sub-caducifolias		2.4	24,204
800	Selvas caducifolias		10.5	105,131
900	Matorrales	Matorral	56.3	565,996
1000	Mezquites y Huizachales		2.7	27,638
400-800	Vegetación secundaria	-	1.1	11,033
1400	Vegetación higrófila	Vegetación higrófila	1.4	14,542
1500	Vegetación halófila	Otros tipos de vegetación	3.2	31,775
	Total		100.0	1,006,000

Diseño de muestreo y selección de leyenda

De los 24,659 sitios del INFyS se seleccionaron de manera aleatoria 140 sitios por clase de la tabla 1 para la evaluación de MOD12Q1. Se seleccionó la cartografía MOD12Q1 del año 2004 para una coherencia temporal óptima entre los datos; en efecto, ésta contiene información de un periodo intermedio entre la cartografía Serie III (2002) y las visitas del INFyS (2004-2007). Cinco leyendas caracterizan a MOD12Q1 (leyendas de entre 9 y 17 clases), respondiendo a esquemas de clasificación de cobertura vegetal reconocidos por la comunidad científica internacional. Dos leyendas (Leyenda Tipo 1, con 17 clases y Leyenda Tipo 5, con 12 clases) derivadas del esquema IGBP ('International Geosphere-Biosphere Programme') contienen características detalladas del bosque (tipo de hoja y estacionalidad del dosel) e incluyen la clase matorral, muy abundante en México. Se eligió la leyenda más agregada de las dos (Tipo 5, con 12 clases, ver tabla 2, primera y segunda columna) por su mayor compatibilidad con la leyenda INEGI y menor inclusión de clases mixtas. En efecto, la leyenda Tipo 1 (con 17

TABLA 2. LEYENDA TIPO 5 DE MOD12Q1 Y CONVERSIÓN DE ETIQUETAS DEL INFyS A LA LEYENDA IGBP TIPO 5

Clases del Mapa de Cobertura Vegetal	Código	Clase Sitio de Referencia	Conversión	Conversión
MODIS (MOD12Q1, Leyenda Tipo 5)			Etiqueta primaria	Etiqueta secundaria
Bosque perenne de coníferas	1	Bosques de coníferas	1	-
Bosque perenne de latifoliadas	2	Bosque de pino-encino	1	4
Bosque deciduo de coníferas	3	Bosque de encino-pino	4	1
Bosque deciduo de latifoliadas	4	Bosque de encino	4	-
Matorral o vegetación arbustiva	5	Bosque mesófilo de montaña	2	-
Pastizal	6	Selvas perennifolias	2	-
Agricultura anual	7	Selvas sub-perennifolias	2	4
Agricultura perenne	8	Selvas sub-caducifolias	4	2
Asentamiento humano	9	Selvas caducifolias	4	-
Superficie con nieve o hielo	10	Matorrales	5	-
Suelo desnudo o vegetación escasa	11	Mezquitales y Huizachales	5	-
Agua	0	Vegetación secundaria	5	1-4 (tipo de bosque)
Sin datos	255	Vegetación higrófila	2	6
		Vegetación halófila	5	6

La conversión de etiquetas guarda la óptica de la clasificación global IGBP, basada en la dominancia fisiognómica arbolada, arbustiva o herbácea. Por ejemplo, la clase 'Vegetación Secundaria' del INEGI está convertida a 'vegetación arbustiva' como etiqueta primaria porque de acuerdo a la cartografía INEGI Serie III, la vegetación secundaria es mayoritariamente arbustiva.

clases) contiene clases como 'matorral cerrado' y 'matorral abierto', 'sabana' y 'sabana boscosa', no comprendidas en la clasificación INEGI y una clase de bosque mixto con definiciones poco claras que introducen incertidumbre en el proceso de comparación con otra cartografía (Jung et al., 2006). La figura 2 ilustra la distribución de los sitios seleccionados en la porción del territorio mexicano con cobertura vegetal y sin uso agropecuario, sobrepuesta al mosaico de seis tejas de la cobertura vegetal MOD12Q1.

Diseño de verificación

Para aminorar las dificultades de evaluar MODIS sobre la cobertura vegetal heterogénea, se construyó un algoritmo basado en una estrategia reciente de evaluación. Esta estrategia, sistematizada por Couturier et al. (2009), consiste en generar índices difusos de confiabilidad (índices con márgenes que representan sesgos posibles), traduciendo diferentes niveles de tolerancia temporal, temática y de posición. El método permite separar las contribuciones de los errores de clasificación, de sesgos posiblemente debidos a la resolución del producto MODIS, y de sesgos posiblemente debidos a la fragmentación / incertidumbre temática o temporal del paisaje tal como aparece en el material de referencia. La estrategia comprende dos etapas.

La primera etapa es la conversión de la leyenda simplificada del INFyS a la leyenda Tipo5 de MOD12Q1, con un aspecto difuso temático. A cada sitio del INFyS, se le atribuye una etiqueta primaria y, en su caso, una etiqueta secundaria (tabla 2). Se efectuará en la segunda etapa una evaluación estricta de los sitios con solamente la etiqueta primaria, y luego una evaluación con mayor grado de tolerancia, incorporando la posibilidad de las dos etiquetas (técnica empleada desde Khorram et al., 2000).

La segunda etapa es el algoritmo de verificación que consiste en la clasificación de los sitios de referencia y su confrontación con el mapa de acuerdo a tres escenarios encadenados por pruebas lógicas, descritas en la tabla 3; un primer escenario (A) de verificación estricta (conocida por enfoque 'Booleano' en la literatura), luego un segundo escenario (B) con tolerancia de posición (algoritmo introducido por Couturier et al., 2009), y finalmente un tercer escenario (C) que incluye tolerancia de posición, tolerancia temática y tolerancia temporal (empleando enfoques conocidos como difuso temático en la literatura). El escenario A privilegia la fuente de información a escala muy fina (el INFyS), misma que está comparado con el

Tabla 3. Algoritmo de evaluación aplicado via SIG a cada sitio de verificación. El algoritmo está constituido por un desencadenamiento de pruebas con niveles crecientes de tolerancia. El escenario A traduce una verificación estricta, el escenario B una verificación con tolerancia de posición, y el escenario C una verificación con tolerancia temática y temporal. Si el sitio reprueba los tres conjuntos de prueba, el sitio evidencia muy probablemente el caso de un error de clasificación de las imágenes MODIS. Este procedimiento permite atribuir al índice de confiabilidad márgenes de los valores posibles para los tipos de sesgo de la verificación

Escenario A:	1ra Prueba lógica en leyenda Tipo 5	Hipótesis	Decisión de 2nda prueba	2nda Prueba lógica en leyenda Tipo 5	Resultado de la verificación
	a. INFyS = Serie III (Caso del 88.1% del área total)	Persistencia de la cobertura vegetal entre 2002 y visita INFyS	Verificación de MOD12Q1 con INFyS	MOD12Q1 = INFyS (etiqueta primaria) MOD12Q1 ≠ INFyS (etiqueta primaria)	Acierto estricto del mapa Ir a escenario B
	b. INFyS ≠ Serie III y posible cambio de cobertura vegetal (caso del 7.5% del área total)	Cambio de la cobertura vegetal entre 2002 y visita INFyS	Verificación de MOD12Q1 con INFyS (fuente más confiable de información que Serie III)	MOD12Q1 = INFyS (etiqueta primaria) MOD12Q1 ≠ INFyS (etiqueta primaria)	Acierto estricto del mapa Ir a escenario B
	c. INFyS ≠ Serie III y cambio de cobertura vegetal improbable (caso del 4.4% del área total)	La serie III no es confiable	Los datos de referencia no son congruentes: se cambia el sitio de verificación		Volver a sortear el sitio de verificación

TABLA 3. CONTINUÍA

Escenario B:	Prueba lógica de análisis espacial	Hipótesis	Resultado de la verificación
(Caso de error del mapa en el escenario anterior)	a. Existe un polígono vecino de la carta Serie III donde: MOD1201 = Serie III	MOD1201 captura correctamente la in-formación parcial de un borde o transición espacial	Acierto del mapa con tolerancia de posición
	b. No existe un polígono vecino de la carta Serie III donde: MOD1201 = Serie III		Ir al escenario C
Escenario C:	Prueba lógica en leyenda Tipo 5	Hipótesis	Resultado de la verificación
(Caso de error del mapa en el escenario anterior)	a. MOD1201 = INFYS (etiqueta secundaria)	MOD1201 captura correctamente un paisaje fragmentado o de eco-tonos	Acierto del mapa con tolerancia temática.
	b. MOD1201 = Serie III	MOD1201 captura correctamente un paisaje antes del cambio Serie III- INFYS	Acierto del mapa con tolerancia temporal.

TABLA 3. CONTINUÍA

Escenario C:	Prueba lógica en leyenda Tipo 5	Hipótesis			Resultado de la verificación
	c. MOD12Q1 ≠ INFYS (etiqueta secundaria) y MOD12Q1 ≠ Serie III	MOD12Q1 es muy probablemente erróneo			Error estricto del mapa

producto MODIS de resolución 1 km². A pesar de la diferencia de escalas, la muy alta correspondencia entre las etiquetas INFyS y Serie III (88.1%, ver resultados de la primera prueba en la tabla 3) tiende a confirmar una buena representación contextual de los sitios de verificación del INFyS (la escala del mapa Serie III avvicina la escala MODIS). En el escenario B (ver tabla 3), se consideró todo polígono a una distancia máxima de 1km del centro del sitio como polígono vecino y susceptible de favorecer la confiabilidad del mapa. Finalmente, el escenario C permitió considerar el sesgo por la posible presencia de múltiples clases temáticas en el sitio.

En resumen, el algoritmo de verificación analiza el rango de valores posibles de los sesgos en la verificación, y así provee dos tipos de información potencialmente útiles en el ámbito de coberturas vegetales heterogéneas:

1. Un rango cuantitativo de estimación para el índice de confiabilidad real del mapa,
2. Un índice de confiabilidad con márgenes de sus valores posibles para este mapa (ver figuras 2 y 3), que ofrece mayor robustez de comparación con índices de otros mapas que un índice único calculado a partir de un solo nivel de tolerancia (Couturier et al., 2009).

Síntesis de la evaluación

Las probabilidades de inclusión de un sitio de la clase k fue la de un muestreo estratificado simple (Stehman, 2001): $p_k = f_k \cdot f_k$ siendo la frecuencia de presencia de la clase k en el área estudiado. En consecuencia, la fórmula para muestreo estratificado simple (ver Cochran, 1977, citado por Mas y Couturier, 2011) fue utilizada para estimar el índice global de confiabilidad. Se calculó también la precisión de la estimación. De acuerdo con la teoría de la distribución binomial, el intervalo de confianza del estimador de la confiabilidad para muestreo estratificado simple depende del tamaño de la muestra y de la confiabilidad de la clase en la siguiente forma (Fitzpatrick-Lins, 1981):

$$d^2 = t^2 p (1-p) / n \quad (1)$$

Donde d es el error sobre la confiabilidad (medio intervalo de confianza), n es el número de puntos de muestreo, p es la confiabilidad de la clase, y $t = 1.96$ para una probabilidad de ocurrencia en la extremidad de la curva Gaussiana inferior a 0.05.

La ecuación (1) no toma en cuenta el fenómeno de auto-correlación espacial de los errores en el mapa. Sin embargo, la remarcable dispersión de la muestra lograda gracias al acervo sistemático de la CONAFOR (5 km es la distancia mínima entre dos sitios) limita eficientemente la ocurrencia de sitios cercanos (ver figura 1) y por lo tanto, consideramos que el efecto de auto-correlación afecta de manera despreciable la precisión de la estimación.

El usuario del mapa MOD12Q1 debe considerar que la superficie considerada en este estudio utiliza el acervo de cobertura vegetal de CONAFOR (suelo sin uso agropecuario) que cubre aproximadamente 51% del territorio mexicano. Por lo tanto, la información más relevante del estudio son los *índices para el productor* del mapa (los que evalúan las superficies de las clases efectivamente encontradas en el terreno), mientras los *índices para el usuario* (que evalúan las superficies visibles en el mapa de las clases) no pueden aplicarse a la totalidad del territorio mexicano, lo que limita su relevancia para un usuario interesado en evaluar el mapa en el conjunto del país.

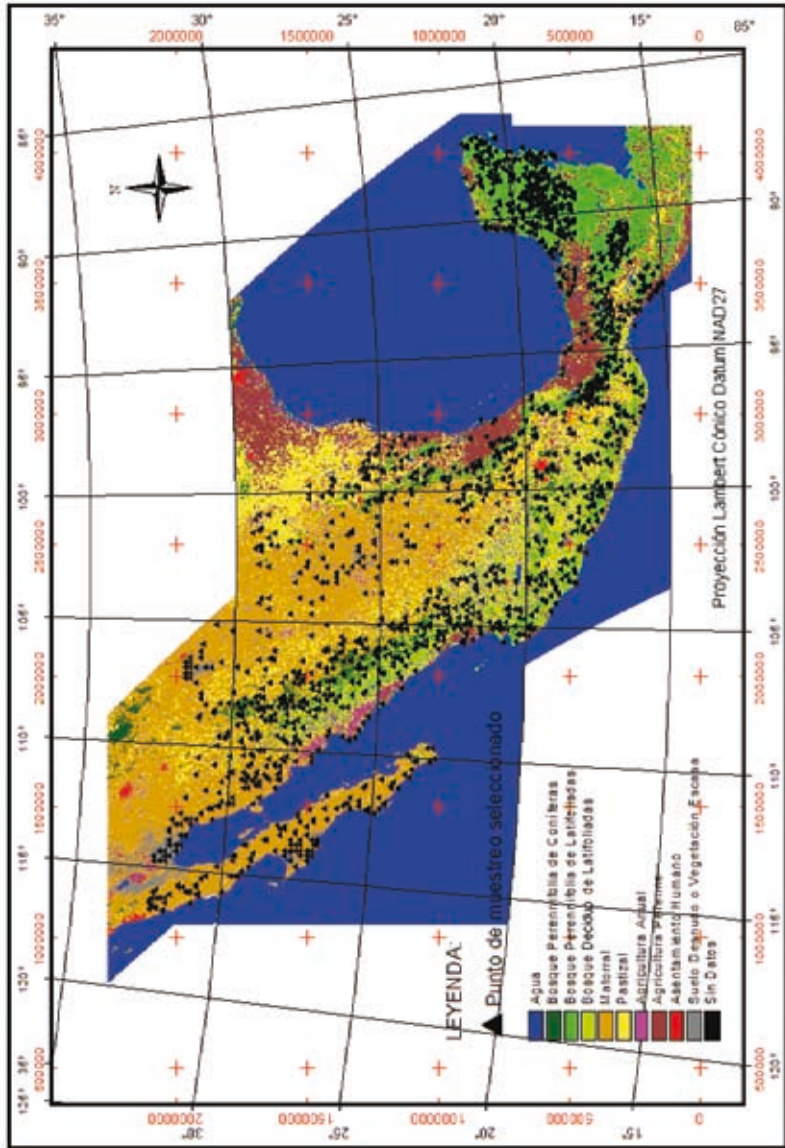
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Confiabilidad global y patrones de confusión

La confiabilidad global y los patrones de confusión entre clases de cobertura vegetal fueron registrados en forma de matrices de confusión (tablas 4-6). Todos los elementos de la matriz corresponden a fracciones del área total bajo estudio (un total de un millón de km²), de acuerdo a las convenciones de Stehman et al. (2003). Esta presentación en fracciones de área permite un análisis coherente de los patrones de confusión entre clases. En una perspectiva de validación de la clasificación de imágenes MODIS, los valores de confiabilidad para el productor del mapa (columna 'Prod' o 'Productor') son especialmente relevantes porque miden la correspondencia o no en el mapa de las clases observadas en los sitios de verificación INFyS de CONAFOR.

La tabla 4 refleja una evaluación conservadora (o 'pesimista') en donde se compararon estrictamente las etiquetas primarias del INFyS con las etiquetas primarias de MODIS. La confiabilidad global en el área observado es de 54.6%, y refleja la confiabilidad moderada (66.1%) del mapa sobre la cobertura de matorrales (60.3% del área, ver la columna 'Frac.') y la confiabilidad muy baja (23.3%, ver la columna gris 'Prod') del mapa en cuanto a la cobertura de bosques deciduos

FIGURA 1. COBERTURA MOD12Q1 DE MÉXICO Y SITIOS MUESTREADOS PARA SU VALIDACIÓN



de latifoliadas (22.2% del área). La gran diversidad fisiognómica expresada por esta clase en el territorio mexicano (selvas bajas y medianas en clima tropical y encinares en clima templado) puede contribuir a explicar el bajo desempeño del clasificador de imágenes MODIS. Destacan también el resultado de muy buena confiabilidad (77.4%) del mapa para la cobertura de bosques perennes de latifoliadas a pesar del tipo de evaluación muy estricto, y el resultado de baja confiabilidad (25.8%) del mapa en cuanto a la cobertura de bosques de coníferas. En un sitio del Noroeste de EUA donde prevalecen bosques perennes de latifoliadas, Friedl et al. (2002) obtienen también un índice de confiabilidad global muy elevado (75%). Sin embargo, Cohen et al. (2003) reivindican un buen desempeño del clasificador en dos sitios de 50 km² del Noreste de EUA en donde prevalecen respectivamente bosques deciduos de latifoliadas y bosques de coníferas. En cambio, este análisis corrobora la tendencia de los resultados de Kalacska et al. (2008) sobre la superficie total de Costa Rica, que establecen una confiabilidad para el productor de 88% en selvas predominantemente perennes, y una confiabilidad para el productor de 35% para selvas predominantemente deciduas.

La información que nos proporciona la matriz en cuanto al tipo de confusión prevaleciente nos permite avanzar en posibles interpretaciones sobre los aciertos y errores del mapa; en efecto, las altas fracciones de la segunda columna de la matriz (clase '2', ver cifras en *itálica*) comparado con las demás columnas traducen que ambas clases de bosque con baja confiabilidad (clase 1 de bosques de coníferas y clase 4 de bosques deciduos), están cartografiadas en gran parte como bosques perennes de latifoliadas (clase 2). Eso significa que el producto MOD12Q1 tiende fuertemente a clasificar todas las coberturas arboladas en México como bosque perenne de latifoliadas (clase 2). En efecto, la confiabilidad de la clase 2 para el usuario del mapa MODIS (renglón 'Usuario') es de 38%, la más baja de las 4 clases evaluadas. Kalacska et al. (2008) encontraron también que la selva caducifolia del sitio de Chamela en México tiende a ser clasificada como selva perennifolia (contribución de 43% del error total). A cambio, la selva caducifolia en su sitio de Santa Rosa en Costa Rica tiende a ser clasificada como suelo agrícola (64.8% del error total). El territorio mexicano es mucho más extenso, y entonces más representativo de la clase bosque, que todos los sitios citados en donde se realizó una evaluación o validación. Una posible explicación de los errores en clases de bosque podría ser que el campo de entrenamiento global del algoritmo de clasificación de MODIS está sesgado hacia la clase 2.

Tabla 4. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EVALUACIÓN Estricta DE LA COBERTURA MODIS UTILIZANDO COMO REFERENCIA LAS ETIQUETAS PRIMARIAS DEL INFYS DE CONAFOR

MODIS: Sitios INFYS:	1	2	4	5	6	7	8	9	11	0	n ^a	Frac. ^b	Prod. ^c	StdErr ^d
B. Coni- feras	0.0179	0.0189	0.0100	0.0112	0.0104	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	248	6.94	25.8	3.0
B. Perennes	0.0024	0.0588	0.0020	0.0026	0.0008	0.0005	0.0069	0.0000	0.0002	0.0017	602	7.59	77.4	2.0
B. Deciduos	0.0121	0.0649	0.0516	0.0238	0.0504	0.0016	0.004	0.0039	0.0094	0.0002	521	22.19	23.3	2.0
Mato- rrales	0.0091	0.0132	0.0088	0.3987	0.1307	0.0014	0.0194	0.0030	0.0188	0.0003	481	60.34	66.1	2.0
n ^a	121	753	162	376	326	15	110	8	65	26	1962			
Frac. ^b	4.14	15.59	7.25	43.75	21.13	0.35	3.15	0.69	3.64	0.32		100		
Usuario ^c	43	38	71	91	NA	NA	NA	NA	NA	NA			54.6	1.0
StdErr ^d	5.0	2.0	4.0	1.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA				

4.2 Márgenes difusos del índice de confiabilidad

Las matrices de las tablas 5 y 6 traducen condiciones de tolerancia creciente (en cuanto a la evaluación posicional del pixel MODIS primero, y en cuanto a la similitud temática con el sitio de verificación posteriormente) en la escala difusa de evaluación de este estudio y por lo tanto se registran confiabilidades más altas, en la tabla 5 comparado con la tabla 4, y en la tabla 6 comparado con la tabla 5. Sin embargo, en estas tablas se mantienen los mismos patrones de confusión discutidos anteriormente. En particular, la confiabilidad de las clases 1 y 4 en el mapa no rebasa los 50% y éstas están confundidas con la clase 2 de manera preponderante. La figura 2 (a y b) sintetiza los índices de confiabilidad por clase contenidos en las matrices. Los tres niveles de tolerancia están representados en la gráfica por márgenes de los valores posibles, así que el índice aparece con márgenes difusos, mismos márgenes que delimitan el segmento en el cual muy probablemente el valor real de la confiabilidad está incluido (Couturier et al., 2009). Es interesante anotar que el valor de los índices de confiabilidad para las clases dominantes en Costa Rica, en el estudio de Kalacska et al. (2008) está incluido en el margen de los valores posibles de nuestro estudio, y está cercano al límite superior de este margen: las confiabilidades de la clase 2 (88%) y de la clase 4 (35%) en Costa Rica están en la parte superior del margen de los valores posibles de las clases 2 y 4 en este estudio en México (respectivamente 77-89% y 23-39%, figura 2a). Vale destacar que la validación cruzada de MOD12Q1 por el equipo Land Cover MODIS (MODIS, 2003) en los sitios globales STEP conduce también a tendencias similares de confiabilidad: Encuentran una confiabilidad de 90.3% para la clase 2, 34.0% para la clase 4, 60.0% para la clase 1, y 61.3% de confiabilidad global (sitios del hemisferio norte de América) contra respectivamente 77-89%, 23-39%, 26-46% (confiabilidades por clase), y 55-65% (confiabilidad global) en este estudio, sus resultados siendo más elevados posiblemente por la homogeneidad de sus sitios.

Las matrices de confusión revelan también que la mayor parte de las confusiones son entre un tipo de bosque y otro, la confiabilidad de la clase 'bosque' derivada de la tabla 6 es de 73% en el territorio mexicano, lo que arroja otro resultado sobresaliente: el producto MOD12Q1 detecta las zonas boscosas con un grado de confianza razonable, comparable con la capacidad de detección bosque - no bosque (72% de acierto) del producto GLC 2000 reportado en Asia del Sur y Sureste (Stibig et al., 2007). Esta característica puede resultar interesante para

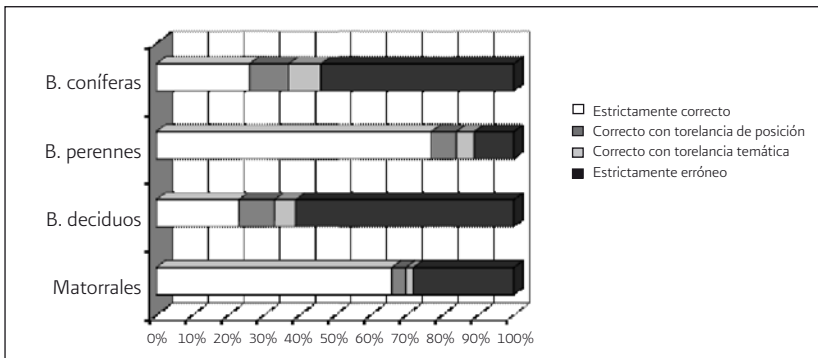
TABLA 5. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EVALUACIÓN DE LA COBERTURA MODIS CON TOLERANCIA DE POSICIÓN DE 1000m (PIXEL MODIS) ENTRE LA COBERTURA MODIS Y LAS ETIQUETAS PRIMARIAS INFY-S DE CONAFOR

MODIS: Sitios INFY-S:	1	2	4	5	6	7	8	9	11	0	n ^a	Frac. ^b	Prod ^c	StdErr ^d
B. Coníferas	0.0258	0.0165	0.0087	0.0100	0.0075	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	248	6.94	37.1	3.0
B. Perennes	0.0023	0.0636	0.0017	0.0022	0.0007	0.0005	0.0043	0.0000	0.0002	0.0003	603	7.59	83.7	2.0
B. Deciduos	0.0075	0.0616	0.0741	0.0225	0.0394	0.0009	0.0026	0.0039	0.0094	0.0000	521	22.19	33.4	2.0
Matorrales	0.0089	0.0132	0.0087	0.4216	0.1150	0.0008	0.0134	0.0030	0.0188	0.0000	481	60.34	69.9	2.0
n ^a	152	748	236	410	270	8	79	8	46	6	1963			
Frac. ^b	4.45	15.49	9.31	45.75	18.32	0.22	2.15	0.69	3.58	0.04		100		
Usuario ^c	58	41	79	92	NA	NA	NA	NA	NA	NA			60.5	1.0
StdErr ^d	4.0	2.0	3.0	1.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA				

Tabla 6. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EVALUACIÓN DE LA COBERTURA MODIS, CON TOLERANCIA DE POSICIÓN DE 1000M, TOLERANCIA TEMÁTICA Y TOLERANCIA TEMPORAL ENTRE LA COBERTURA MODIS Y LAS ETIQUETAS DEL INFYS Y DE LA SERIE III INEGI

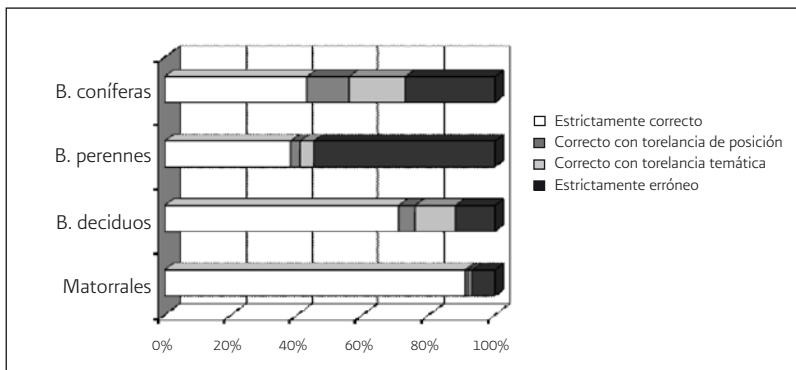
MODIS: Sitios INFYS:	1	2	4	5	6	7	8	9	11	0	n ^a	Frac ^b	Prod ^c	StdErr ^d
B. Coníferas	0.0319	0.0147	0.0048	0.0095	0.0075	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	248	6.94	46.0	3.2
B. Perennes	0.0023	0.0675	0.0012	0.0014	0.0001	0.0005	0.0026	0.0000	0.0001	0.0001	603	7.59	88.9	1.3
B. Deciduos	0.0037	0.0557	0.0871	0.0199	0.0392	0.0009	0.0023	0.0039	0.0093	0.0000	521	22.19	39.2	2.1
Matorrales	0.0056	0.0113	0.0058	0.4360	0.1119	0.0003	0.0106	0.0030	0.0188	0.0000	481	60.34	72.3	2.0
n ^a	148	745	244	438	269	8	64	8	37	2	1963			
Frac ^b	4.36	14.93	9.89	46.75	18.62	0.17	1.67	0.69	2.92	0.01		100		
Usuario ^c	73	45	88	93	NA	NA	NA	NA	NA	NA			65.0	1.1
StdErr ^d	4.0	2.0	2.0	1.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA				

FIGURA 2A. ÍNDICE DIFUSO DE CONFIABILIDAD DEL PRODUCTOR PARA LA CLASIFICACIÓN MODIS DE LA COBERTURA VEGETAL, POR CLASE FENOLÓGICA



B. Coníferas: Bosques dominados por coníferas; B. Perennes: Bosques de latifoliadas dominados por árboles perennes (selvas perennifolias y sub-perennifolias); B. Deciduos: Bosques dominados por árboles latifoliadas deciduos (bosques dominados por deciduos y selvas caducifolias y sub-caducifolias). El índice de confiabilidad con márgenes de sus valores posibles ofrece mayor robustez de comparación con índices de otros mapas que un índice clásico calculado a partir de un solo nivel de tolerancia (Couturier et al., 2009).

FIGURA 2B. ÍNDICE DIFUSO DE CONFIABILIDAD DEL USUARIO PARA LA CLASIFICACIÓN MODIS DE LA COBERTURA VEGETAL, POR CLASE FENOLÓGICA



B. Coníferas: Bosques dominados por coníferas; B. Perennes: Bosques de latifoliadas dominados por árboles perennes (selvas perennifolias y sub-perennifolias); B. Deciduos: Bosques dominados por árboles latifoliadas deciduos (bosques dominados por deciduos y selvas caducifolias y sub-caducifolias). El índice de confiabilidad con márgenes de sus valores posibles ofrece mayor robustez de comparación con índices de otros mapas que un índice clásico calculado a partir de un solo nivel de tolerancia (Couturier et al., 2009).

aplicaciones de regeneración de la cobertura vegetal, en donde se necesita reconocer la transición bosque / no bosque en el terreno. En cambio, este estudio no puede determinar con qué grado de confianza MODIS detecta zonas deforestadas, pues ni los pastizales ni los suelos de uso agropecuario ni la mayoría de las zonas de vegetación secundaria están descritas en el muestreo del INFyS. Sin embargo, bastaría conocer la distribución de los bosques cultivados para poder inferir la zona no arbolada con uso agropecuario en México y calcular la confiabilidad de la clasificación por MODIS de esta superficie como 'no bosque'.

La figura 2a (confiabilidad del productor) da un resumen de los aciertos y errores del clasificador MODIS, información útil para el equipo científico de MODIS en vista a un posible mejoramiento del producto MOD12Q1. Por ejemplo para mejorar el aprendizaje del árbol de decisión del clasificador, es útil saber que la clasificación de los bosques de coníferas y de los bosques deciduos está afectada por muchos errores en la extensión total de México. La figura 2b da una información útil para el usuario del mapa MOD12Q1 derivado de MODIS; Por ejemplo, cuando el usuario ve pixeles con etiqueta de clase 2, hay muy poca confiabilidad en que este pixel realmente represente bosque perenne de latifoliadas. En cambio, cuando el usuario ve una etiqueta de clase 4 o 5, la confiabilidad para que sea realmente bosque deciduo o matorral es relativamente alta. Sin embargo, la confiabilidad para el usuario no considera los errores de MODIS en la extensión de territorio sin cobertura vegetal o de uso agropecuario, así que el índice del usuario para quien observa el mapa de todo México no se puede derivar de este estudio.

Confiabilidad por tipo de bosque

En un afán de diferenciar el patrón de confiabilidad por tipo de bosque identificado en el terreno por el muestreo INFyS, la figura 3 desglosa los índices de confiabilidad por clase según la leyenda del sistema de clasificación presentado en la tabla 1. Varios conjuntos se desprenden de la comparación de la confiabilidad entre clases. El grupo de clases mejor clasificado comprende las selvas subperennifolias y perennifolias y los bosques mesófilos de montaña. Los matorrales (incluyendo a la sub-clase 'Mezquitales y Huizachales') están clasificados con una confiabilidad superior a 66%. El grupo de tres clases 'vegetación secundaria', 'higrófila' y 'halófila' está caracterizado por el margen más ancho de los valores posibles, lo que se explica en parte por la dificultad de convertir estas clases en el sistema clasificatorio de MODIS. Otro conjunto incluye las clases con presencia

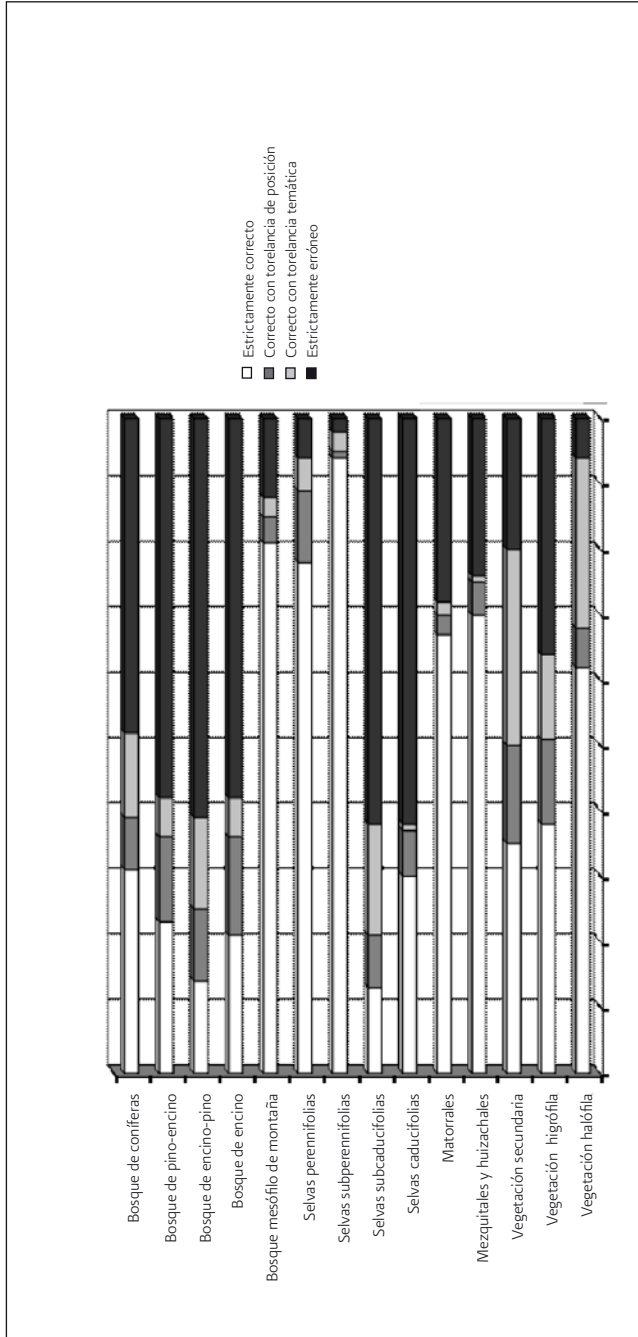
de bosque deciduo (Bosques templados de pino-encino, encino-pino, y encino, y selvas caducifolias y sub-caducifolias), caracterizado por los más bajos índices de confiabilidad (inferiores a 45%). Por fin, el desempeño de la clasificación de la clase de bosques de coníferas (entre 30% y 53%) está por debajo de la confiabilidad de la validación cruzada del equipo Land Cover MODIS para bosques de coníferas (60.0%; MODIS: 2003). Estos resultados desglosados evidencian cierta homogeneidad de respuesta a dentro de las 3 clases arboladas en la leyenda IGBP (clases 1, 2 y 4). Por lo tanto, este estudio aboga por la interpretación de que una respuesta diferente de tipos de bosque específicos no está al origen del bajo desempeño observado del clasificador MODIS, sino que más bien, la calibración del clasificador supervisado parece estar sistemáticamente sesgado hacia la clase 2 para México.

Implicaciones para el clasificador de MODIS

El acervo de referencia del clasificador está basado en una representación global de 1,370 sitios (MODIS, 2003), de los cuales 204 sitios de bosques perennes de latifoliadas, 131 de bosques perennes de coníferas y 57 de bosques deciduos de latifoliadas. El territorio mexicano es mucho más extenso que los sitios citados en donde se realizó una evaluación de confiabilidad. Una posible explicación de los errores en clases de bosque podría ser que la amplia gama de bosques presentes en México está sub-representada en el campo de entrenamiento global del algoritmo de clasificación de MODIS, mismo que está sesgado hacia la clase 2 para esta gama. Una sugerencia que puede desprenderse de nuestros resultados sería incluir en los sitios de entrenamiento una muestra de la extensa porción de selva baja caducifolia en México, lo cual balancearía una posible sub-representación de esta clase en STEP.

El reto de mejoramiento de la futura cartografía derivada de MODIS está asociado con la importancia que reviste el tipo de hoja (conífera o latifoliada) y la fenología (decidua o perenne) de la vegetación en la derivación de variables biofísicas (ej.: biomasa, Índice de Área Foliar) del bosque, y en los estudios de modificación de los ecosistemas. Las características estructurales del bosque, como su grado de fragmentación y de cobertura, son factores de heterogeneidad que introducen dificultad en la clasificación. Sin embargo, el diseño de evaluación contempló altos grados de tolerancia en término de variación estructural del paisaje (aspecto difuso, efectos de escala), y a pesar de esta consideración, la confiabilidad de muchas clases fue relativamente baja.

FIGURA 3. ÍNDICE DIFUSO DE CONFIABILIDAD DEL PRODUCTOR PARA LA CLASIFICACIÓN MODIS, POR CADA CLASE DE COBERTURA VEGETAL EN MÉXICO



El índice de confiabilidad con márgenes de sus valores posibles ofrece mayor robustez de comparación con índices de otros mapas que un índice clásico calculado a partir de un solo nivel de tolerancia (Couturier et al., 2009).

Existen otros sistemas de clasificación aplicados a sensores de baja resolución, que privilegian la descripción de Tipos Funcionales de Ecosistemas (TFE, ver Paruelo et al., 2001) al lugar de elementos estructurales incluidos en la clasificación IGBP y en la mayoría de los sistemas clasificatorios internacionales, como es el tipo de hoja. Los insumos del clasificador MODIS incluyen la variación anual de la reflectancia. Por lo tanto el algoritmo está diseñado para discriminar las coberturas por estacionalidad, una característica funcional importante de la vegetación. Sin embargo, el algoritmo no integra todavía información térmica (bandas térmicas de MODIS), que podría mejorar el potencial de detección de las características funcionales de los ecosistemas. El sistema de clasificación por TFE, a partir de variables como el NDVI anualmente integrado, fecha de aumento de NDVI, variación térmica anual, etc., podría desembocar en una clasificación más general de los ecosistemas en México, de acuerdo a procesos energéticos susceptibles de ser suficientes para derivar ciertos parámetros (e.g., dinámica de la productividad primaria) en una modelación biogeoquímica regional. Esta clasificación podría ser más adaptada y confiable considerando la capacidad de los sensores de baja resolución. No obstante, la elaboración de conjuntos de TFE tiene la desventaja de depender de las variables incluidas en el algoritmo de la clasificación y un mapa de TFE sería difícilmente comparable con un mapa de TFE en otra región del mundo.

El equipo científico de MODIS propone un mapa MOD12Q1 con etiquetas secundarias de mapeo. La tabla 7 muestra los resultados de la evaluación de este producto, con un escenario de verificación que considera la tolerancia de las dos etiquetas MODIS y una tolerancia de posición del tamaño de pixel MODIS. El estudio muestra que la confiabilidad de las etiquetas primarias y secundarias de MOD12Q1 describe la cobertura vegetal de México con un 74.7% de acierto. También el equipo científico MODIS prevé indicadores de calidad por pixel ('quality assessment maps') incluidos con los mapas MOD12Q1, mismos que todavía no contienen datos. Este ejercicio de evaluación como los anteriores puede contribuir a caracterizar la calidad de los pixeles MOD12Q1.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

En este trabajo por un lado se recuerda la presencia substancial, de acuerdo con los estudios de evaluación de la cartografía internacional, de errores debidos a los límites de la herramienta que son las imágenes de satélite. Por otro lado los aciertos y los sesgos de MOD12Q1 (índice de confiabilidad global con márgenes de los

valores posibles entre 54.6% y 65.0%) confirman las tendencias registradas por otro ejercicio de evaluación en Costa Rica (CR) y por la validación cruzada global (VCG) de MOD12Q1, y marcan tendencias en donde otras evaluaciones están posiblemente afectadas por poca representatividad.

La evaluación de productos cartográficos globales está afectada por sesgos cuyo manejo es objeto de una amplia investigación en la literatura, en donde el enfoque difuso cobra importancia (ej. Jung et al., 2006). En particular, la mayor parte de los estudios de evaluación citados en este capítulo evita una verificación en las zonas de cobertura vegetal heterogénea, sin embargo éstas son indispensables de considerar para una evaluación estadísticamente exhaustiva. El atribuir márgenes de los valores posibles al índice de confiabilidad parecería disminuir la precisión del índice, comparada con la de un índice único. Por el contrario, marcar estos márgenes es dar a conocer una limitación real de los datos de evaluación estadísticamente exhaustiva (con sitios de referencia potencialmente heterogéneos), mientras esta limitación, cuya existencia es ampliamente reconocida, usualmente no se da a conocer en otros estudios.

El bosque perenne de latifoliadas está caracterizado por niveles de confiabilidad de hasta 88.9% para el productor (CR: 88% y VCG: 90.3%), pero desde la perspectiva del usuario del mapa, un pixel etiquetado bosque perenne de latifoliadas tiene menos del 45% de probabilidad de ser así en la realidad. Destaca un patrón de confiabilidad baja para las demás categorías de bosques en la nomenclatura del IGBP, como son los bosques de coníferas (menos de 46.0% de confiabilidad) y los bosques deciduos de latifoliadas (menos de 39.2% de confiabilidad, versus CR: 35% y VCG: 34.0%). Las confusiones que contribuyeron a la mayor extensión boscosa erróneamente cartografiada se encontraron en las sub-zonas de selva tropical seca y de encinar en donde el producto MOD12Q1 reporta mucha presencia de bosque perenne de latifoliadas y de pastizal, respectivamente.

El producto MOD12Q1 tiende fuertemente a clasificar todas las coberturas arboladas en México como bosque perenne de latifoliadas (clase 2). Es difícil pronunciarse sobre la razón de los errores del clasificador más allá de la hipótesis de una alta heterogeneidad en México de los paisajes que contienen cobertura arbolada. En efecto, la inclusión de la segunda etiqueta de MOD12Q1 en la evaluación asciende su confiabilidad global a 74.7%. Por el carácter sistemático del sesgo en clasificar como bosque perenne de latifoliadas los demás bosques, se puede sugerir intentar mejorar la calibración del clasificador de MODIS, ya sea añadiendo conocimiento regional previo al árbol de decisión, o bien considerando ampliar la base de sitios de entrenamiento de bosques deciduos y de coníferas en México para el clasificador.

Tabla 7. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EVALUACIÓN DEL CONJUNTO DE ETIQUETAS PRIMARIA Y SECUNDARIA DE LA COBERTURA MODIS, CON TOLERANCIA DE POSICIÓN DE 1000M ENTRE LA COBERTURA MODIS Y LA ETIQUETA PRIMARIA DEL INFYS

MODIS: Sitios INFYS:	1	2	4	5	6	7	8	9	11	0	n ^a	Frac. ^b	Prod ^c	StdErr ^d
B. Coníferas	0.0358	0.0143	0.0049	0.0055	0.0079	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	248	6.94	51.6	3.0
B. Perennes	0.0020	0.0669	0.0012	0.0017	0.0000	0.0002	0.0035	0.0000	0.0001	0.0003	603	7.59	88.1	1.0
B. Deciduos	0.0065	0.0478	0.1108	0.0047	0.0376	0.0009	0.0035	0.0039	0.0062	0.0000	521	22.19	49.9	2.0
Matorrales	0.0089	0.0128	0.0056	0.5101	0.0413	0.0004	0.0112	0.0030	0.0103	0.0000	481	60.34	84.5	2.0
n ^a	170	741	285	419	212	6	76	8	40	4	1963			
Frac. ^b	5.32	14.18	12.26	52.29	11.04	0.14	1.94	0.69	2.08	0.06		100		
Usuario ^c	67	47	90	98	NA	NA	NA	NA	NA	NA			74.7	1.0
StdErr ^d	4.0	2.0	2.0	1.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA				

Alternativamente los resultados presentados pueden indicar los límites de la capacidad de discernimiento del sensor MODIS en paisajes subtropicales heterogéneos. El reto de mejoramiento de la futura cartografía derivada de MODIS está asociado con la importancia que reviste el tipo de hoja (conífera o latifoliada) y la fenología (decidua o perenne) de la vegetación en la derivación de variables biofísicas (ej.: biomasa, Índice de Área Foliar) del bosque, de balances biogeoquímicos regionales (ej.: emisión o retención de carbono) y en los estudios de degradación de los ecosistemas.

El muestreo nacional sistemático del INFyS de CONAFOR da la oportunidad de obtener, vía el método propuesto, una evaluación cuantitativa, espacialmente exhaustiva del producto MODIS, un ejercicio inédito para un mapa global de cobertura vegetal, y una pista metodológica para la evaluación de la cartografía actual e índices derivados publicados por SEMARNAT. La detección de la clase agregada 'bosque' se eleva a 73% de acierto para el productor del mapa (CR: 76%), lo que delimita perspectivas para aplicaciones de detección de cambios no bosque – bosque (regeneración), mientras no se puede deducir de este estudio la capacidad de detección de zonas deforestadas pues la mayoría de estas zonas no están representadas en el INFyS.

Desde el año 2003, el monitoreo de la cobertura vegetal en México está basado en imágenes de satélite del sensor MODIS, comparable por su resolución y capacidad espectral de discernimiento al sensor SPOT-VEGETATION utilizado por Stibig et al. (2007) en Asia. SEMARNAT podría entonces contemplar la utilización de sensores de resolución similar a Landsat (insumo de Stibig et al., 2007), como por ejemplo SPOT o ASTER, para evaluar su cartografía actual. A este efecto, el método de evaluación descrito en este trabajo se podría emplear para el propósito fundamental de validación de la cartografía nacional.

AGRADECIMIENTOS

Este capítulo fue elaborado en el marco del proyecto 'Evaluación del sensor MODIS para el monitoreo anual de la vegetación forestal de México' financiado por los Fondos Sectoriales CONACYT-CONAFOR (número 14741), en el cual el autor recibió una beca posdoctoral, y para una fase ulterior de la investigación, en el marco del proyecto PAPIIT 'IN-307410' (Observatorio Territorial para la Evaluación de Amenazas y Riesgos), financiado por DGAPA-UNAM. Agradezco al equipo de trabajo en CONAFOR, que proporcionó los datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), y el INEGI, que nos entregó la cartografía de la Serie III en el

ámbito del convenio general de colaboración entre el INEGI y la UNAM (Licencias DGAD-0022/2008). Agradezco también a todo el equipo MODIS de la NASA por distribuir de manera fluida y libre los datos del sensor.

REFERENCIAS

- Büttner, G. y G. Maucha, 2006. The thematic accuracy of CORINE Land Cover 2000: Assessment using LUCAS. Reporte técnico de la Unión Europea, Report/No7/2006, <http://reports.eea.europa.eu/>, accedido 04/2007.
- Cochran, W. G., 1977. *Sampling Techniques*. John Wiley and Sons (3ra ed.), Nueva York. 428pp.
- Cohen, W.B., T.K. Maierperger, Z. Yang, S.T. Gower, D.P. Turner, W.D. Ritts, M. Berterretche y S.W. Running, 2003. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: a quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products, *Remote Sensing of Environment* 88: 233-255.
- CONAFOR, 2008. Especificaciones técnicas para el monitoreo de la cobertura de la vegetación basado en imágenes de satélite MODIS; URL: http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/, último acceso en febrero de 2011.
- Couturier, S., 2007. Evaluación de errores de cartas de cobertura vegetal y usos de suelo con enfoque difuso y con la simulación de imágenes de satélite. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México y Université Toulouse III (Francia), México, D.F. 276p.
- Couturier, S., Á. Vega-Guzmán, J.-F. Mas, V. Coria-Tapia y E. López-Granados, 2008. Evaluación de confiabilidad del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000: diseños de muestreo y caracterización difusa de paisajes. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 67: 20-38.
- Couturier, S., J.-F. Mas, G. Cuevas, J. Benítez, A. Vega-Guzmán y V. Coria-Tapia, 2009. An accuracy index with positional and thematic fuzzy bounds for land-cover/ land-use maps, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(7): 789-806.
- Couturier, S., y J.-F. Mas, 2009. ¿Qué tan confiable es una tasa de deforestación?: Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico, *Investigaciones Ambientales (ed. INE)*, 1(2): 117-135.
- Fitzpatrick-Lins, K., 1981. Comparison of sampling procedures and data analysis for a land-use and land-cover map, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47: 343-351.

- Friedl, M.A., D.K. McIver, J.C.F. Hodges, X.Y. Zhang., D. Muchoney, A.H. Strahler, et al., 2002. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results, *Remote Sensing of Environment* 83: 287-302.
- Green, D. R. y W. Hartley. 2000. Integrating photo-interpretation and GIS for vegetation mapping: some issues of error. En: R. Alexander y A. C. Millington (eds.). *Vegetation Mapping from Patch to Planet*. John Wiley and Sons; Nueva York. pp. 103-134.
- Huete A., K. Didan, T. Miura, E. Rodriguez, X. Gao y L. Ferreira, 2002. Overview of radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83: 195-213.
- INEGI, Informe 2007 Inventario Nacional Forestal y de Suelos, <http://www.inegi.org.mx/rne/docs/Pdfs/Mesa3/20/RodolfoOrozco.pdf> , último acceso, Febrero 2011.
- Jung, M., K. Henkel, M. Herold y G. Churkina, 2006. Exploiting synergies of global land cover products for carbon cycle modeling, *Remote Sensing of Environment* 101: 534-553.
- Kalacska, M., G.A. Sanchez-Azofeifa, B. Rivard, J.C. Calvo-Alvarado y M. Quesada, 2008. Baseline assessment for environmental services payments from satellite imagery: A case study from Costa Rica and Mexico, *Journal of Environmental Management* 88 (2): 348-359.
- Khorram, S., J. Knight, H. Cakir, H. Yan, Z. Mao y X. Dai, 2000. Improving estimates of the accuracy of thematic maps when using aerial photos as the ground reference source, *Proceedings of the ASPRS Symposium*, Washington, EUA.
- Laba, M., S. K. Gregory, J. Braden, et al., 2002. Conventional and fuzzy accuracy assessment of the New York Gap Analysis Project land cover map. *Remote Sensing of Environment* 81: 443-455.
- Mas, J.-F., A. Velázquez, J. L. Palacio-Prieto, G. Bocco, A. Peralta y J. Prado, 2002. Assessing forest resources in Mexico: Wall-to-wall land use/ cover mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (10): 966-969.
- Mas, J.-F. y S. Couturier, 2011. Evaluación de la fiabilidad temática de bases de datos cartográficas. En: F. Bautista Zuñiga, H. Delfín González y J. L. Palacio Prieto (eds.). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (2ª edición). Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología; México, D.F. 509 p.
- Mayaux, P., H. Eva, J. Gallego, A. Strahler, M. Herold, S. Agrawal, S. Naumov, E. E. De Miranda, C. Di Bella, C. Ordoyne, Y. Kopin y P.S. Roy, 2006. Validation of the Global Land Cover 2000 map, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 44 (7): 1728-1739.

- MODIS, 2001. USGS Distributed Active Archive Center: <http://lpdaac.usgs.gov/order.asp>. Último acceso: abril de 2008.
- MODIS, 2003. Validation of the consistent year 2003 V003 MODIS land cover product. MODIS land cover team: <http://geography.bu.edu/landcover/userguidelc/consistent.htm>.
- Muchoney, D., J. Borak, H. Chi, M. Friedl, S. Gopal, J. Hodges, N. Morrow y A. Strahler, 2000. Application of the MODIS global supervised classification model to vegetation and land cover mapping of Central America, *International Journal of Remote Sensing*, 21 (6&7): 1115-1138.
- Palacio-Prieto, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J.-F. Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna-González et al., 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas* 43: 183-202.
- Paruelo, J.M., Jobbagy, E.G. y O.E. Sala, 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America, *Ecosystems* 4: 683-698.
- Remmel, T.K., Csillag F., Mitchell S., y M. Wulder, 2005. Integration of forest inventory and satellite imagery: a Canadian status assessment and research issues, *Forest Ecology and Management* 207: 405-428.
- Stehman, S. V. y R. L. Czaplewski, 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment* 64: 331-344.
- Stehman, S. V., 2001. Statistical rigor and practical utility in thematic map accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67: 727-734.
- Stehman, S. V., J. D. Wickham, J. H. Smith y L. Yang, 2003. Thematic accuracy of the 1992 National Land-Cover Data for the eastern United-States: Statistical methodology and regional results. *Remote Sensing of Environment* 86: 500-516.
- Stibig, H. J., A. S. Belward, P. S. Roy, U. Rosalina-Wasrin et al., 2007. A land-cover map for South and Southeast Asia derived from SPOT- VEGETATION data. *Journal of Biogeography* 34: 625-637.
- Wickham, J. D., S. V. Stehman, J. H. Smith y L. Yang, 2004. Thematic accuracy of the 1992 National Land-Cover Data for the western United-States. *Remote Sensing of Environment* 91: 452-468.
- Wulder, M. A., J. C. White, S. Magnussen y S. McDonald, 2007. Validation of a large area land cover product using purpose-acquired airborne video. *Remote Sensing of Environment* 106: 480-491.
- Zhu, Z., L. Yang, S. V. Stehman y R. L. Czaplewski, 2000. Accuracy assessment for the U.S. Geological Survey regional land-cover mapping program: New-York and New Jersey region. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66: 1425-1435.

Autores

EGÍDIO ARAI. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil, 12227-010. Tel.: 55-12-3208-6431, Fax: 55-12-3208-6488. Correo-e: egidio @dsr.inpe.br.

RENÉ COLDITZ. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Av. Liga Periférico- Insurgentes Sur 4903, Tlalpan 14010, México D.F. Tel. (55)-50-04-50-20.

STÉPHANE COUTURIER. Laboratorio de Análisis Geo-Espacial (LAGE), Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Circuito Exterior s/n, Coyoacán 04510, México DF, México, Tel: (52-55) 56 22 43 34 ext. 45488, Fax: (52-55) 56 16 21 45. Correo-e: andres@igg.unam.mx.

MARÍA ISABEL CRUZ LÓPEZ. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Av. Liga Periférico- Insurgentes Sur 4903, Tlalpan 14010, México D.F. Tel. (55)-50-04-50-20.

VALDETE DUARTE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil, 12227-010. Tel.: 55-12-3945-6439, Fax: 55-12-3945-6488. Correo-e: valdete@dsr.inpe.br.

TZITZIKI JANIK GARCÍA-MORA. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia Michoacán México. Correo-e: biol_tzitziki@yahoo.com.

- EDWARD P. GLENN. Environmental Research Laboratory, University of Arizona, Tucson, AZ, 85706, EE.UU.
- EVERETT ALAN HINKLEY. National Remote Sensing Program Manager. USDA Forest Service, 1601 N. Kent Street / Suite 500, Arlington, Virginia 22209, EE.UU.
- ALFREDO R. HUETE. Plant Functional Biology and Climate Change Cluster, Department of Environmental Sciences, University of Technology, Sydney. PO Box 123, Broadway, NSW 2007, Sydney, Australia. Correo-e: lfredo.huete@uts.edu.au.
- ANDRÉ LIMA. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil, 12227-010. Tel.: 55-12-3208-6458, Fax: 55-12-3208-6488. Correo-e: andre @dsr.inpe.br.
- GERARDO LÓPEZ SALDAÑA. Mullard Space Science Laboratory, Department of Space and Climate Physics. University College London, Holmbury St. Mary, Dorking, Surrey, RH5 6NT, Gran Bretaña.
- JEAN-FRANÇOIS MAS. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta. C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México. Correo-e: jfmas@ciga.unam.mx.
- BRAD QUAYLE. USDA Forest Service Remote Sensing Applications Center, Salt Lake City, Utah, 84119, EUA.
- RAINER RESSL. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Av. Liga Periférico- Insurgentes Sur 4903, Tlalpan 14010, México D.F. Tel. (55)-50-04-50-20.
- NATALIA RESTREPO-COUBE. Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of Arizona, Tucson, AZ, 85721, EE.UU.
- EDGAR RICARDO ROSALES ARRIAGA. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L Tamayo. Contoy No.137, Col. Lomas de Padierna, Del. Tlalpan, C.P. 14740, México, D.F. Correo-e:erosales@centrogeo.org.mx.
- BERNARDO F. T. RUDORFF. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil, 12227-010. Tel.: 55-12-3208-6490, Fax: 55-12-3208-6488. Correo-e: bernardo @dsr.inpe.br.
- JOÃO R. SANTOS. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil, 12227-010. Tel.: 55-12-3208-6427. Fax: 55-12-3208-6488. Correo-e: jroberto @dsr.inpe.br.
- BRIAN SCHWIND. Forest Service Remote Sensing Applications Center, Salt Lake City, Utah, 84119, EE.UU.

YOSIO E. SHIMABUKURO. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Av. Dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil, 12227-010. Tel.: 55-12-3208-6483. Fax: 55-12-3208-6488. Correo-e: yosio@dsr.inpe.br.

RAMÓN SOLANO-BARAJAS. Department of Soil, Water and Environmental Science, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, EE.UU.

FELIPE OMAR TAPIA SILVA. Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L Tamayo. Contoy No.137, Col. Lomas de Padierna, Del. Tlalpan, C.P. 14740, México, D.F. / Universidad Autónoma Metropolitana Campus Iztapalapa, Depto. de Hidrobiología, San Rafael Atlixco No.186, Col. Vicentina, Del. Iztapalapa, C.P.09340, México D.F. Correo-e: otapia@centrogeo.org.mx.

Índice analítico

- Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), 13-15, 21, 29, 31, 34, 51, 61, 72, 73, 75, 81, 85, 125, 128, 130, 151, 168, 173, 176, 178, 179, 181, 183, 215, 254, 305
- Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), 11-13, 27, 45, 46, 97, 99, 107, 147, 176, 196, 197, 212, 256, 278
- aerosoles (MOD04), 27, 80
- albedo y la función de la distribución de la reflectancia bi-direccional (MOD43), 26, 41, 52, 198, 206, 207, 208
- Amazonia brasileña, 124, 136
- análisis de correlación, univariada (Ta/LST),
 - por estados, 260, 265-267
 - por regiones hidrológicas, 267-269
 - todo el país, 262
- multivariada (Ta/LST/NDVI)
 - por regiones hidrológicas, 270
 - todo el país, 269
- ángulos-sol, 197, 201, 202, 205, 208, 209, 223
 - visión, 197, 200, 201, 202, 205, 208, 209, 223
- archivos KMZ, 188, 189
- áreas quemadas, 125, 132, 134, 136, 158
 - ASTER, 164
 - índices espectrales 158
 - NDVI, 158
 - NBR, 159
 - validar, 164
 - áreas quemadas, producto de (MCD45), 26, 60, 61
- ARVI , 198
- AVHRR, 196, 197, 212
- back propagation, 240
- biodiversidad, 276, 277, 282
- biofísico, 195, 196, 197, 210, 211, 213
- bio-ópticos, algoritmos, 20
- bosque, mesófilo 283, 285, 299
 - de coníferas, 283, 285, 292, 294, 297, 298, 299, 301, 304
 - de encinos, 276, 281, 283, 285, 299
- casi en tiempo real, 72
- Centro de Aplicaciones de Percepción Remota (RSAC), 173, 176, 179 -184, 186, 191, 192

Centro de Vuelos Espaciales Goddard (GSFC),
 19, 179, 180, 183, 184, 191, 192
 Centro Nacional de Predicción Ambiental
 (NCEP), 34
 centros activos de almacenamiento (DAACs),
 19
 climatología de México, 254, 257, 262
 CMG 199, 201, 202, 221
 cobertura de nieve (MOD10), 26, 34, 36
 cobertura del suelo, producto de (MOD12),
 21, 26, 38, 49, 52, 55, 62, 101, 103,
 111, 221, 249, 250, 275, 278, 279,
 280, 282, 283, 284, 286, 294, 298,
 302, 304
 colecciones, 209
 componentes principales, análisis de (ACP),
 106, 107
 compuestos de 8 días, 38, 42, 47, 49, 51,
 57, 100, 101, 130, 158, 159, 199,
 206, 231, 234, 235, 242, 244-256
 CONABIO, 11, 19, 34, 48, 57, 79, 145, 147,
 148, 150, 151, 154, 155, 158, 159,
 164, 165, 166, 168, 209
 confiabilidad, 275-280, 282, 286, 290, 292,
 294, 297-299, 301, 302, 304, 306
 Convención de Estocolmo, 12
 CV-MVC, 201

 datos auxiliares, 20, 21, 102, 103
 deforestación, 124, 127, 134, 135, 136,
 137, 141
 departamento del interior (DOI), 174
 detección de incendios forestales, 150
 caracterización del sitio, 154
 MOD14 thermal anomalies/fire, 151
 punto de calor, 150, 159-164
 píxeles potenciales, 152
 DETEQ, 125, 127, 131, 133, 134, 138, 140
 DETER, 125, 128, 131, 133, 134, 136
 difusa, 281, 294
 direct broadcast, 19, 73, 147
 distribución, 75

 doble logística, 107, 108

 Earth Observing System (EOS), 13, 19, 30,
 32, 71-73, 75, 78, 82, 83, 85, 86, 101,
 173, 176, 180, 181, 196
 EOS Data and Operations System
 (EDOS), 19, 180
 EOSDIS (Earth Observing System Data
 and Information System), 13, 32, 78
 EOSDIS Core System, 32
 ecosistemas, 195, 196, 210, 212, 213, 214,
 215, 216, 218, 220, 221, 222
 efecto Hughes, 105, 237, 243
 ENOS, 196
 EOS, 71, 73
 error, 275-277, 280, 282, 286, 290, 291,
 294, 298, 299, 301, 302, 304, 306
 margen de, 275-277
 escalas de agregación espacial, 254
 estación de recepción, 74
 evapotranspiración (ET), 195, 213, 216
 EVI, 196, 198, 199, 201, 203, 211, 213,
 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220,
 221

 fAPAR, 210, 212, 213, 214, 215, 218
 fenología, 196, 210, 211, 215, 220, 221,
 222, 223, 304
 fotosíntesis, 195, 197, 210, 212, 213, 214,
 215, 217, 222
 fracción de radiación activa fotosintética FPAR
 (MOD15), 34, 48, 49, 51, 53.
 fracción de vegetación (MOD44), 26, 57, 59
 fracción sombra, 132, 138, 139
 fracción suelo, 132, 135
 función de distribución de la reflectancia bi-
 direccional (BRDF), 34, 41, 42
 Fv, 210, 211, 212, 213

 gaussiana asimétrica, 107, 108
 Geosphere Biosphere Programme (IGBP), 12,
 53, 55, 111, 115, 237, 249, 250, 284,

299, 301

GPP (GEP), 214, 215, 216, 217, 218, 221

gránulos, 20, 21, 29, 31, 60, 78, 83

hielo marino, producto de MOD29, 34

imágenes fracción, 132, 133

índice de área foliar o LAI, 26, 48, 49, 53, 210, 211, 212, 213, 215, 218

índice de diferencia normalizada del agua, 101

índice de propagación, 156

HANTS, 157

NDVI, 156

serie de tiempo, 156

índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), 100, 198

índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), 36, 45, 46, 47, 48, 81, 89, 90, 99, 100, 101, 108, 154, 156, 157, 158, 159, 160, 196, 197, 201, 204, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 219, 220, 221, 234, 255, 256, 257, 259, 262, 269, 270, 272, 301

índice de vegetación mejorado (EVI), 45, 46, 48, 52, 55, 90, 100, 101, 103, 155, 196, 198, 201, 211, 215, 216, 219, 220, 221, 234, 282

índice verde (GI), 100

índices de vegetación (MOD13), 12, 26, 34, 45, 47, 49, 81, 85, 87, 88, 98, 99, 100, 103, 107, 108, 145, 156, 195, 196, 222, 231, 234, 235, 237, 244, 245, 277

INEGI, 275-277, 279, 282-286, 305, 306

INFyS, 275, 279, 282-286, 290, 292, 298, 299, 304, 305

Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE), 124

inventario. Véase INFyS

LAI, 210, 211, 212, 213, 215, 218

latifoliada, 279, 285, 292, 294, 297, 298, 301, 302, 304

lectura directa, 209

lógica difusa, 111, 241

LP-DAAC, 198

LSWI, 221

mallá de modelado climático, 30, 199

máscara de nube (MOD35), 27, 80

máxima verosimilitud, 108, 109, 231, 237, 240

México, 195, 202, 209, 219

MOcean, 26

MOD09, 128, 129, 130

MOD12Q1, 275, 278-280, 282-286, 291, 294, 298, 302, 304

modelo digital de elevación (MDE), 130

Modelo Lineal de Mezcla Espectral, 131

Modelos para estimar Ta. Véase análisis de correlación

MODIS Atmosphere, 26

MODIS Land (MODLAND), 13, 25, 26, 27, 29, 30, 32, 34, 85, 234

monitoreo, 124, 138

muestreo, 275, 280-282, 284, 290, 298, 299, 304, 306, 307

National Polar-orbiting Operational Satellite System (NPOESS), 21, 168, 192

National Snow and Ice Center (NSIDC), 78

Warehouse Inventory Search Tool (WIST), 75

NBAR, 199, 206, 208, 221

NDVI, 196, 197, 199, 201, 203, 204, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221

nivel 1A MOD01, 19, 20, 26

nivel 1B (MOD02), 20, 26, 33

nivel L1 (MOD03), 20, 26, 83

NPOESS proyecto preparatorio (NPP), 21, 218

- percepción multicapa, 237, 238
- perfiles atmosféricos (MOD07), 27
- pixeles válidos, 152
 - saturación del pixel, 151
 - Sun glint (reflejo del sol), 153
- portales de distribución, 75
- Comisión Nacional para el Conocimiento y
 - Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 79
 - Global Land Cover Facility (GLF), 78
 - Global Visualization Viewer (GloVis), 78
 - Land Proceses Distributed Active Archive Center (LP DAAC), 78
 - Level 1 and Atmosphere Products (LA-ADS), 78
- productos atmosféricos, 78
- probabilidades a priori p(H), 238, 240, 249
- procesamiento, 79
- Data Pool HDFEOS-to-GeoTiff (HEG), 83
 - Direct Readout Lab (DRL), 81
 - Geospatial Data Abstraction Library (GDAL), 84
 - International MODIS/AIRS Processing Package (IMAPP), 80
 - MODIS reprojection tools MRT/ MRTSwath, 82
 - MODIS SWATH-toGrid (MS2GT), 83
 - Scientific Package Application (SPA), 81
 - SEAWIFS Data Analysis System (SEADAS), 80
- producción primaria
 - producto de (MOD17), 21, 26, 49, 50, 51
- productos criosféricos, 78
- productos oceánicos, 78
- productos terrestres, 78
- productos MODIS
 - LST, 254-256, 261
 - NDVI, 259
- puntos de calor e incendios (MOD14), 21, 26, 56, 57, 81
- Quality Assessment (QA), 27, 57, 60, 85, 89, 105, 106, 158, 200, 201, 208
- recepción de datos, 73
- reducción dimensional, 105
- reflectancia bihemisférica, 42
- reflectancia de la superficie, producto de (MOD09), 20, 26, 27, 33, 42, 49, 58, 81, 98, 128, 129, 130, 138, 158, 198, 199, 200, 206, 207, 208, 234, 259
- reflectancia direccional esférica (Black Sky), 42
- representatividad espacial, 257-259
- satélites ambientales operacionales polares (POES), 176
- satélites medioambientales operacionales geoestacionarios (GOES), 147, 186.
- SAVI, 198
- Savitzky-Golay, filtro de 87, 107, 108
- SDS, 199, 200, 201, 204
- segmentación, 132
- selva
 - caducifolia, 275, 284, 285, 294, 297, 299, 301
 - perennifolia, 284, 285, 294, 297, 299
- series de tiempo, 87
 - Hants, 88
 - Timesat, 87
 - TimeStats, 90
 - TiSeG, 89
- sistema de Distribución de Archivos de la Atmósfera (LAADS), 19, 78
- sistema de procesamiento adaptable (MODAPS), 19
- SNOMAP, algoritmo, 36
- suelo, 275, 276, 279, 285, 291, 294, 298, 305, 306
 - uso del, 276
- SVM, 215, 216
- temperatura, 151
 - umbrales, 152

temperatura superficial. Véase productos MODIS-LST

temperatura y la emisividad de la superficie terrestre (MOD11), 21, 26, 27, 36, 38, 253, 254, 255, 256, 261, 270

Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS), 18, 180

transformación Tasseled Cap (TCT), 107

transformada ondula, 102, 105

transmisión directa, 19, 73, 79, 179, 182, 209

USDA, 173, 174, 181, 184, 191, 192

uso de suelo. Véase suelo

validación, 276, 278, 280, 291, 292, 294, 298, 299, 302, 305

vapor de agua, producto de (MOD05), 27

Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS), 11, 21, 22, 168, 192

visualización y análisis básico, 85

HDFExplorer y HDF View, 86

HDF-Look / Msphinx 85

Land Data Operational Product Evaluation (LDOPE), 85

VPM 215

Warehouse Inventory Search Tool (WIST), 19, 75, 76, 78, 79, 83

Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio, coordinado por Jean-François Mas, (coordinador) se terminó de editar en formato electrónico en septiembre de 2011.