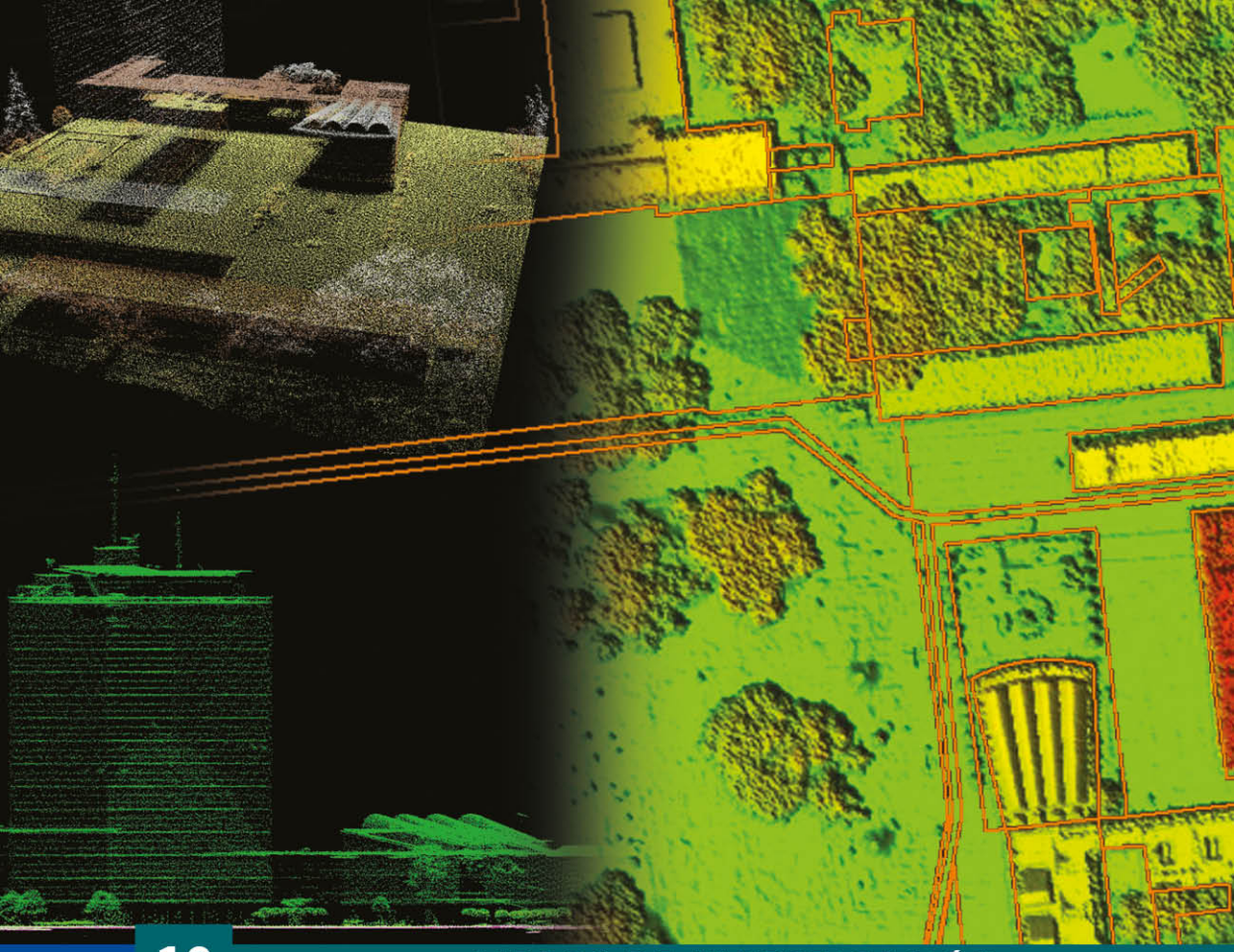


10 LIBROS DE INVESTIGACIÓN

Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones

José Antonio Quintero Pérez
Coordinador

IG INSTITUTO DE GEOGRAFÍA UNAM

Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones

Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Colección: Libros de investigación, núm. 10

Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones

José Antonio Quintero Pérez
(Coordinador)

México, 2025

Temas selectos geomática: métodos y aplicaciones / coord. José Antonio Quintero Pérez.--México, UNAM, Instituto de Geografía, 2012.
280 p.; il.; 22 cm. (Geografía para el Siglo xxi, Serie Libros de investigación, 10)
Incluye bibliografías
ISBN 970-32-2976-X
ISBN 978-607-02-3785-0

1. Geomática 2. Imágenes de satélite 3. Fotografías aéreas. I. t., II. UNAM, Instituto de Geografía, III. Serie.

Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones

Primera edición, 01 de abril de 2025

D.R. © 2025 Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria
Coyoacán, 04510
México, D. F.
Instituto de Geografía
www.unam.mx
www.igeograf.unam.mx

Prohibida la reproducción parcial o total
por cualquier medio, sin la autorización escrita
del titular de los derechos patrimoniales.

La presente publicación presenta los resultados de una investigación científica y contó con dictámenes de expertos externos, de acuerdo con las normas editoriales del Instituto de Geografía.

Libros de investigación
ISBN (Obra general): 978-607-30-9142-8
ISBN: 978-607-587-281-0

Impreso y hecho en México

Contenido

Presentación……9
José Omar Moncada Maya

Introducción……11
José Antonio Quintero Pérez

Capítulo 1. Mosaicos ortorectificados generados a partir…… 15
de fotografías aéreas digitales de pequeño formato
Jorge Prado Molina y Armando Peralta Higuera

Capítulo 2. Evaluación práctica y teórica de los modelos…… 47
de regresión logística múltiple y cartográfica-hidrológica
para la predicción de deslizamientos de tierra
Gabriel Legorreta Paulín, Marcus Bursik,
Fernando Aceves Quesada, Luis Mario Paredes Mejía,
José Lugo Hubp, Irasema Alcántara Ayala
y José López García

Capítulo 3. Aplicaciones oceanográficas de las imágenes…… 77
satelitales NOAA-AVHRR y SeaStar (Orbwiew-2)-SeaWiFS
en los mares mexicanos
Olivia Salmerón García

Capítulo 4. Utilización de imágenes aéreas digitales…… 91
de alta resolución en la evaluación de recursos naturales
Jorge Prado Molina, Armando Peralta Higuera y José López García

Capítulo 5. Distribución de aves rapaces..... 115
en Los Tuxtlas: un acercamiento espacio-estadístico
José Antonio Quintero Pérez y Ana Rosa Rosales Tapia

Capítulo 6. Aplicación del software FROG_V2..... 151
en el análisis fractal del espacio geográfico
Jean-François Parrot

Capítulo 7. Reconocimiento automatizado de las zonas..... 183
de encharcamiento a partir de un Modelo Digital de Elevación.
Ejemplo de la zona urbana de Valle de Chalco, México
Carolina Ramírez Núñez y Jean-François Parrot

Capítulo 8. Reconstitución tridimensional de un paleo-relieve..... 197
Aplicación al estudio del talud gravitacional "La Galera"
en el municipio de Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla, México
Verónica Ochoa Tejeda

Capítulo 9. Análisis de cambios con fotografías..... 217
aéreas digitales e imágenes de satélite Spot5 en la Reserva
de la Biósfera Mariposa Monarca
José López García

Capítulo 10. Ajustes del algoritmo AQM2008..... 231
para identificación de áreas quemadas usando imágenes MODIS
Lilia Manzo Delgado

Capítulo 11. Observaciones satelitales e *in situ* de un evento..... 245
de marea roja en la Bahía de Navachiste, Sinaloa, México
Raúl Aguirre Gómez, Aída Martínez López y Diana C. Escobedo Urías

Bibliografía..... 257

Presentación

Para el Instituto de Geografía de la UNAM es muy satisfactorio presentar este segundo libro sobre un tema tan atractivo para los profesionales de la geografía, como de otras disciplinas, como es *Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones*. La importancia que ha adquirido este relativamente nuevo campo del conocimiento es cada vez mayor, dado el impacto que tiene en ámbitos tan diversos, como puede ser su aplicación en el estudio del relieve, los océanos o los incendios forestales.

Si en el primer libro, *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*, coordinado por Raúl Aguirre (2009), se incluyeron aspectos históricos y teóricos del desarrollo de esta disciplina en nuestro país, este segundo libro muestra algunos ejemplos de sus aplicaciones, tanto en la UNAM como en otras instituciones.

Las aplicaciones que se muestran a través de los textos que conforman el libro son solo ejemplos de la gran diversidad que se ha alcanzado dentro de las investigaciones que se realizan en nuestra dependencia, particularmente en el Laboratorio de Análisis GeoEspacial. Pero por otra parte, son también reflejo de las relaciones que se han establecido entre los investigadores de las ciencias sociales o naturales con estas nuevas técnicas de investigación. Así lo muestra el hecho de que varios de los capítulos han sido elaborados en coautoría con académicos de otras instituciones, como son Marcus Busik, profesor de la State University of New York, Verónica Ochoa de la Universidad de Estrasburgo y Aída López y Diana Cecilia Escobedo del Instituto Politécnico Nacional.

La obra, en su conjunto, abre posibilidades a que en un futuro cercano se puedan incluir nuevas aplicaciones en el ámbito de las actividades sociales y económicas, como pudieran ser la agricultura, los aspectos urbanos o los cambios de uso del suelo.

Mi reconocimiento a los autores que aceptaron colaborar en esta obra, y muy en especial al coordinador de la misma, Mtro. José Antonio Quintero, por el trabajo realizado.

Dr. José Omar Moncada Maya

Introducción

Este libro emerge como consecuencia de su predecesor (Aguirre, 2009)[1] y de la necesidad de continuar avanzando en el desarrollo de la geomática con métodos y aplicaciones tanto clásicas como alternativas que contribuyan al entendimiento de las actividades humanas, ambientales y las combinaciones de éstas desde sus principios básicos: matemáticas, física, filosofía y geografía. Estas cuatro disciplinas nos dan el concepto de espacio que actualmente se maneja de una manera cognitiva y hoy en día se sustenta en herramientas como las tecnologías de la información geográfica, sensores remotos, sistemas de posicionamiento, y disciplinas como geodesia y gravimetría, entre otras, que nos permiten estudiar y describir el espacio geográfico.

El término "geomática" nace en Canadá en 1969 acuñado por Français Bernard Dubuisson, quien se dedicaba a la fotogrametría y agrimensura. Si se descompone la palabra en sus raíces tenemos *geo* (Tierra) y *matica* (informática) lo cual nos lleva al estudio de la Tierra por medio de la reciente inventada computadora. Para finales de la década de los sesenta el uso de las computadoras no era algo popular pero comenzaban a "automatizar" de entre otras cosas la cartografía, recordemos que a principios de esta década, en 1963, en este país Roger Tomlinson acuña el nombre de "sistemas de información geográfica" quien ya hacía uso de los primeros sistemas de cómputo aplicados a la geografía. La geomática comienza a tomar fuerza hasta que en 1985 se crea la carrera como una ciencia en la Universidad de Laval en Québec y desde aquí comienza a extenderse a los países anglosajones con este nombre, para adoptarlo más tarde en el resto del mundo como geoinformática.

Dar una definición de geomática, tal y como se planteó en el primer libro, es un tanto cuanto complicado ya que definiciones hay como autores en la materia existen, quienes le agregan o quitan elementos del enunciado original de acuerdo con lo que el investigador se dedique, su formación, época y contexto en

[1] Aguirre Gómez, R. (coord.; 2009), *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*, Geografía para el siglo XXI, Serie Libros de Investigación, núm. 5, Instituto de Geografía, UNAM, México.

el que esté envuelto, pero se puede citar la primera definición con la que Bernard Dubuisson acuñó el término: "es una disciplina que tiene por objeto la administración y estructuración de los datos con referencia espacial e integra las ciencias y las tecnologías ligadas al almacenamiento, el tratamiento y la difusión de esta".

En el primer libro de geomática se tocaron aspectos teóricos e históricos con algunos ejemplos en torno a los sistemas de información geográfica (SIG), percepción remota (PR) y sistemas de posicionamiento global o GPS (por sus siglas en inglés), así como aplicaciones de los modelos digitales de terreno (MDT), evaluación multi-criterio (EMC), abarcando temas biofísicos y socioeconómicos desde el ordenamiento territorial hasta riesgos. En este segundo libro se presentan métodos y aplicaciones que van desde el análisis espacial geoestadístico hasta la dimensión fractal, pasando por redes neuronales, ensayos híbridos en trabajos que involucran imágenes de alta resolución, adaptación y diseño de algoritmos tanto en ambientes terrestres como marinos.

El capítulo de Prado y Peralta "Mosaicos ortorectificados generados a partir de fotografías aéreas digitales de pequeño formato" nos describe el procedimiento para la creación de mosaicos con imágenes de alta resolución espacial. Este trabajo hace una descripción detallada de los procesos que involucra la utilización de cámaras digitales de pequeño formato y sus ventajas frente a técnicas tradicionales de fotografía aérea comenzando por la calibración de los instrumentos, terminando con los puntos de control.

En el capítulo de Legorreta y colaboradores "Evaluación práctica y teórica de los modelos de regresión logística múltiple y cartográfica-hidrológica para la predicción de deslizamientos de tierra", se nos habla de la predicción de potenciales deslizamientos de tierra con la integración de dos modelos, el Stability Index Mapping y regresión logística múltiple en un análisis de redes neuronales. Este trabajo bajo condiciones naturales es contrastado con condiciones teóricas para hacer un balance entre las ventajas y las limitaciones de cada modelo con un ejemplo al norte del estado de California, Estados Unidos.

En el capítulo de Salmerón "Aplicaciones oceanográficas de las imágenes satelitales NOAA-AVHRR y SeaStar (Orbwiew-2)-SeaWiFS en los mares mexicanos", se hace un repaso de los principios básicos de la percepción remota enfocándose en oceanografía con el sensor AVHRR y SeaWiFS, mencionando algunos estudios en México donde se han utilizado éstos en el análisis de la dinámica de la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila *a* y sus implicaciones.

El capítulo de Prado y López, "Utilización de imágenes aéreas digitales de alta resolución en la evaluación de recursos naturales", habla de cómo evaluar recursos naturales con imágenes de alta resolución. Muestra el potencial para

resaltar algunos de los aspectos más importantes de la vegetación, como la clasificación de árboles de manera individual, lo que permite cuantificar su diversidad e identificar especies espacial y temporalmente.

El capítulo de Quintero y Rosales: "Distribución de aves rapaces en Los Tuxtlas: un acercamiento espacio-estadístico" presenta un estudio sobre la distribución espacial de aves de presa en el sur de Veracruz. Con la ayuda de una imagen del satélite Landsat, un sistema de información geográfica y métodos estadísticos bajo interpretación espacial, se da una explicación al patrón de distribución y sus relaciones con el espacio físico-biológico del área en estudio tomando en cuenta la etología de estas aves.

El capítulo de Parrot: "Aplicación del software FROG_V2 en el análisis fractal del espacio geográfico", presenta las nuevas herramientas que se integran al programa FROG v. 2.0 para medir la dimensión fractal. Este programa nos ofrece caracterizar el espacio geográfico tomando en cuenta sus dimisiones, partiendo de una geometría Euclidiana. También se nos da una visión de la morfología matemática y el reconocimiento de patrones pasando por el exponente de Hurst para el estudio de la rugosidad, terminando con la extracción de rasgos urbanos de la ciudad de Acapulco.

El capítulo de Ramírez y Parrot: "Reconocimiento automatizado de las zonas de encharcamiento a partir de un Modelo Digital de Elevación. Ejemplo de la zona urbana de Valle de Chalco, México", muestra la capacidad de respuesta de un modelo digital de terreno en las ciencias ambientales. Brinda un ejemplo en el valle de Chalco que corresponde con una de las zonas de mayor hundimiento en la Cuenca de México y por ende sus inundaciones, mediante el desarrollo de un algoritmo llamado *charco* que extrae las depresiones en el modelo.

El capítulo de Ochoa: "Reconstitución tridimensional de un paleo-relieve. Aplicación al estudio del talud gravitacional "La Galera" en el municipio de Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla, México", nos habla de simulaciones tridimensionales para el estudio morfogenético reconstruyendo un antiguo paisaje en la Sierra Norte de Puebla. Aborda el proceso de remoción en masa comparando y evaluando las tasas de crecimiento de los relieves utilizando modelos numéricos de terreno con la propuesta de un algoritmo, ayudándose con percepción remota y estereoscopía.

El capítulo de López: "Análisis de cambios con fotografías aéreas digitales e imágenes de satélite SPOT-5 en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca", brinda una continuación del trabajo publicado en el primer libro sobre los cambios en la cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. En el primer trabajo se hizo un análisis de esta área en los años 2003, 2005 y 2006 con fotografías aéreas digitales, mientras que en este trabajo se concibe una metodología híbrida

entre las fotografías aéreas y el uso de imágenes del satélite SPOT-5 para el periodo 2006-2007, consiguiendo con esto mayor precisión en la identificación de cambios.

El capítulo de Manzo, "Ajustes del algoritmo AQM2008 para identificación de áreas quemadas usando imágenes MODIS", presenta un algoritmo aplicado a imágenes MODIS en el sureste de México para aéreas quemadas en 2008. La autora hace una evaluación de su trabajo comparando MODIS con imágenes de mayor resolución espacial utilizando los satélites SPOT y LandSat, dándonos un panorama de la importancia de la detección de incendios y las consideraciones para su estudio y extrapolación a otras áreas del país.

En el capítulo de Aguirre *et al.*, "Observaciones satelitales e *in situ* de un evento de marea roja en la Bahía de Navachiste, Sinaloa, México", se describe un evento de marea roja en las costas de Sinaloa con la ayuda de los sensores AVHRR y SeaWiFS. Con el trabajo de campo de cuatro cruceros para muestrear y observaciones satelitales, se describen los factores físicos y biológicos que pueden influir en la presencia de varias especies de dinoflagelados que provocan esta marea.

El libro que ahora se publica, es resultado de la colaboración y el trabajo de todos los autores que contribuyeron a su creación; gracias por su originalidad y el tiempo que le dedicaron ya que esta publicación no existiría sin ellos.

Se agradece la colaboración de la M. en G. Ana Rosa Rosales Tapia en las diversas tareas que implica coordinar un libro, desde su organización hasta el respaldo de los capítulos.

El reconocimiento a los dictaminadores anónimos de todos los capítulos por su trabajo y comentarios que indudablemente mejoraron el contenido.

Gracias a la Dra. Irasema Alcántara Ayala, tanto por su participación en el libro, como por el apoyo para esta obra durante su gestión como directora del Instituto de Geografía de la UNAM.

Gracias al Dr. José Omar Moncada Maya por su apoyo e impulso final para la publicación de este libro en su papel de actual director del Instituto de Geografía de la UNAM.

Por último, gracias a la sección editorial del Instituto de Geografía de la UNAM por su labor para sacar adelante este segundo libro de Geomática.

Sirva éste como un aporte más de la UNAM para la adquisición o el fortalecimiento de una cultura geoespacial, así como en nuevos conocimientos en el campo de la Geografía.

José Antonio Quintero Pérez
Coordinador
abril de 2012

Capítulo 1. Mosaicos ortorectificados generados a partir de fotografías aéreas digitales de pequeño formato

Jorge Prado Molina
Armando Peralta Higuera
Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Las cámaras digitales de formato pequeño tienen el tamaño equivalente a una película de 35 mm, y se les llama así para distinguirlas de los equipos aerofotográficos convencionales que utilizan negativos de 23 x 23 cm. Estas cámaras hacen su aparición alrededor de 1995 y su característica principal es que están equipadas con sensores electrónicos de estado sólido CCD (*Charged-Coupled Device*: Dispositivo de carga acoplada), y que de inmediato fueron introducidas a las tareas de teledetección (Mills *et al.*, 1996). Aunque años antes ya se habían utilizado estos mismos sensores en la adquisición de imágenes de video multiespectral (Everitt y Escobar, 1995; King, 1992), sin embargo, la baja resolución del video convencional fue una limitante que evitó que este tipo de imágenes se utilizara de manera extendida, caso contrario a lo que ocurrió con la fotografía digital.

En los últimos años, el uso de imágenes aéreas digitales de alta resolución, obtenidas a partir de cámaras de formato pequeño, ha adquirido gran importancia en la solución de varios problemas, especialmente en la evaluación de recursos naturales (Carranza *et al.*, 2003; Key *et al.*, 2001; Peralta *et al.*, 2003; Pouliot y King, 2005; Prado y Peralta, 2005; Prado *et al.*, 2007; Wulder *et al.*, 2004; WWF, 2009). Estas imágenes representan ventajas significativas en comparación con aquéllas obtenidas desde plataformas satelitales, debido a las características ya señaladas, además de su disponibilidad casi inmediata después del vuelo.

Para el análisis de una zona amplia del territorio, es necesario contar con un cubrimiento fotográfico que permita la formación de un mosaico. Sin embargo, se deben corregir todas las distorsiones ocurridas durante la obtención de cada

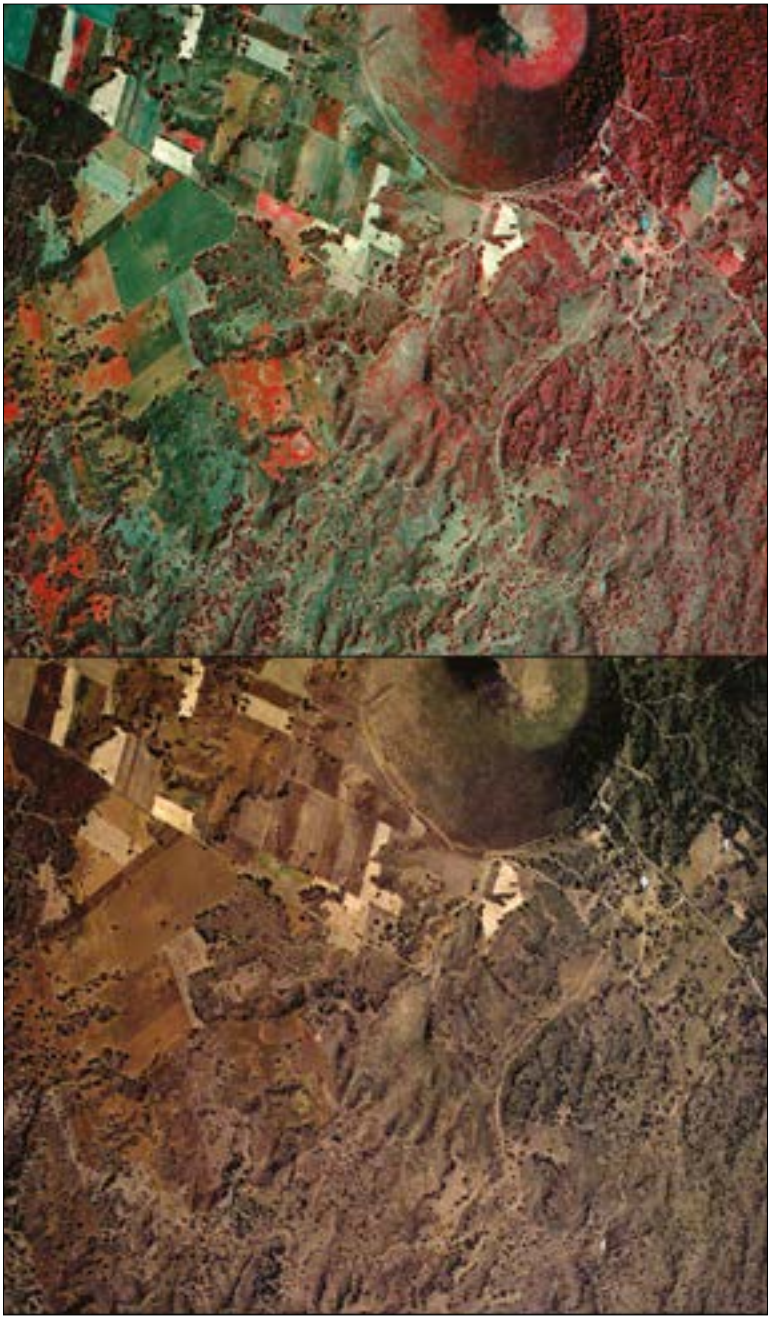


Figura 1. Un ejemplo de la calidad y resolución que ofrecen las fotografías aéreas digitales de pequeño formato. A la izquierda se muestra la imagen en color y a la derecha un compuesto de bandas: verde, roja e infrarroja.

una de las imágenes para lograr una representación plana de la superficie y tener una escala uniforme a lo largo de todo el mosaico. De esta manera se hablaría de la generación de mosaicos ortorectificados, que cuentan con la calidad pictórica de la fotografía y la precisión de un mapa, siendo material muy valioso para una gran variedad de estudios geoespaciales.

Las distorsiones en las imágenes aéreas se deben a tres causas principales: al diseño intrínseco de los lentes de las cámaras y al proceso de ensamblado de las mismas, a la distancia variable entre la aeronave y la superficie terrestre (distorsión por relieve) y, por último, a las desviaciones en tres ejes que sufre la aeronave debido a irregularidades en el vuelo.

El sistema de lentes de la cámara introduce una deformación al momento de adquirir las imágenes; que generalmente es radial simétrica, aunque también puede ser descentrada o una combinación de ambas. Dichas deformaciones son modeladas durante el proceso de calibración, mismo que se explicará más adelante. De él se obtienen: la distancia focal calibrada, la localización del punto principal y la distorsión del lente, a estos tres parámetros se les conoce como elementos de orientación interna. Los desplazamientos por relieve se deben a las diferencias de altura entre una zona plana del terreno y las montañas. Éstas aparentan un mayor tamaño, debido a que se encuentran más cerca de la cámara. Para corregir este efecto y que el mapa final tenga la misma escala en toda su extensión, es necesario utilizar un modelo digital de elevación. Finalmente, como la aeronave sufre movimientos y giros aleatorios durante la campaña aérea, las imágenes no son estrictamente verticales, por tanto, es necesario conocer los ángulos de rotación del sensor de imagen durante cada toma. Si además se adquiere la coordenada geográfica del centro de cada imagen, se tendrá información sobre su posición en la Tierra (georreferencia). A estos parámetros (las coordenadas del centro de toma y los ángulos de rotación) se les conoce como elementos de orientación externa.

Todos los factores involucrados en las distorsiones pueden ser corregidos si los parámetros de cada etapa pueden ser determinados. Para lograr esto, es necesario entonces obtener los elementos de orientación interna y externa, al menos tres puntos de control terrestre por imagen, así como un modelo digital de elevación. Toda esta información es relevante para reconstruir las características geométricas (posición y orientación) del momento exacto de la toma con respecto a un sistema de ejes terrestre en tres dimensiones y así poder corregir las distorsiones y obtener imágenes con características métricas. A partir de ellas se obtienen los mosaicos ortorectificados que, como todo mapa, tienen un determinado error. Lo importante es considerar su magnitud, para saber cuáles son las limitaciones de su utilización.

A lo largo de este capítulo se describen algunas técnicas fotogramétricas convencionales que fueron adaptadas, como aquéllas que logran la calibración de las cámaras y la corrección geométrica de las imágenes (Prado *et al.*, 2003), pasos necesarios paro obtener los mosaicos ortorectificados.

Imágenes multiespectrales

Una imagen multiespectral está formada por diferentes bandas de datos o multicapas que contienen la información espectral de los objetos observados. Para su despliegue visual, las bandas pueden ser combinadas de diferente manera para observar diversas cosas, facilitando así la interpretación (Figura 2).

Todos los materiales reflejan, transmiten y absorben la luz incidente a diversas longitudes de onda de manera selectiva, por tanto, exhiben un color característico al ojo humano. El color de la vegetación dice mucho sobre ella, incluyendo su clase taxonómica y su estado fisiológico. Por esta razón, las imágenes satelitales multiespectrales han sido utilizadas con gran éxito durante muchos años para elaborar mapas de vegetación (véase por ejemplo NASA, 2011). En nuestro caso se utiliza la imagen en color con tres bandas (RGB) y una adicional en IR (950-1100 nm). Las

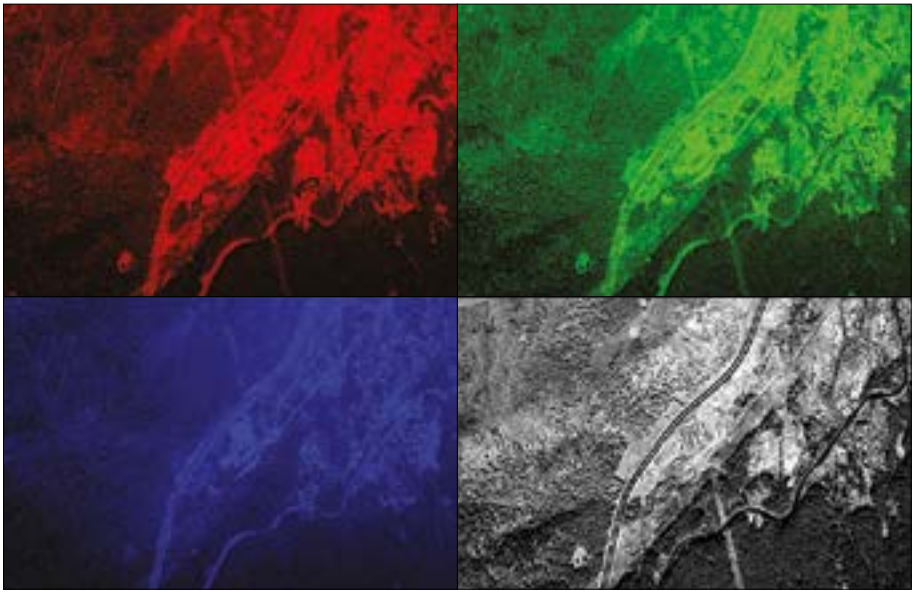


Figura 2. Ejemplo de imágenes multiespectrales RGB (rojo, verde y azul) e IR.

cámaras están acopladas y alineadas, de tal manera que ambas capturan aproximadamente la misma escena, teniendo una cobertura muy parecida sobre el terreno. Para formar un compuesto en falso color es necesario primero ajustar el tamaño de las imágenes visible e IR, esto se debe a que normalmente no se usa el mismo tipo de cámara y lente para ambas. El ajuste se logra al sobreponer encima de la visible la imagen IR con 50% de trasparencia para ver a través de ella, y enseguida realizar los cambios de tamaño por zonas e inclusive hacer alguna rotación hasta lograr ensamblarlas adecuadamente. Una vez completado este paso, hay que añadir a las capas RGB un canal Alpha y copiar en él la imagen infrarroja ajustada, después hay que copiar el canal verde y pegarlo sobre el azul, copiar el rojo y pegarlo sobre el verde y, por último, copiar el canal Alpha y pegarlo en el rojo. Esto da como resultado lo que se conoce como un compuesto en falso color de cuatro bandas. Un ejemplo de una imagen en color y una compuesta se muestran en la Figura 1.

Sistema de adquisición de imágenes

Para la obtención de imágenes de una manera más eficiente, es recomendable contar con un sistema que permita llevar a cabo el levantamiento aéreo de una forma ordenada, totalmente planeada y supervisada. Además de la selección de los equipos adecuados, es necesario contar con un programa de computadora que ayude a planear el levantamiento, que lo efectúe de manera autónoma y que lo supervise durante su ejecución. En el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se ha desarrollado un sistema completo de adquisición de imágenes que permite efectuar todas las tareas mencionadas (Prado *et al.*, 2000a; Prado *et al.*, 2006). Este sistema ha sido utilizado a lo largo de los años con distintas variantes, es decir, que las particularidades de cada proyecto han permitido o no, la utilización de la plataforma estabilizada o la unidad de medición inercial desarrollada en nuestro laboratorio (Prado *et al.*, 2000b). Y como se menciona más adelante, estos dos componentes son deseables, más no indispensables. En la Figura 3 se muestra un diagrama de conexiones del equipo básico para la captura de imágenes y que está constituido por dos cámaras fotográficas; una en color y otra adaptada para capturar imágenes IR, una laptop que se encarga de efectuar la parte automática del levantamiento, dos receptores GPS, un intervalómetro para disparo independiente de las cámaras y baterías para el caso de que no sea posible utilizar alguna fuente de energía de la propia aeronave. El intervalómetro puede sustituir a la laptop en la función del disparo de las cámaras, llevando este proceso de forma manual. El GPS 1 tiene como función

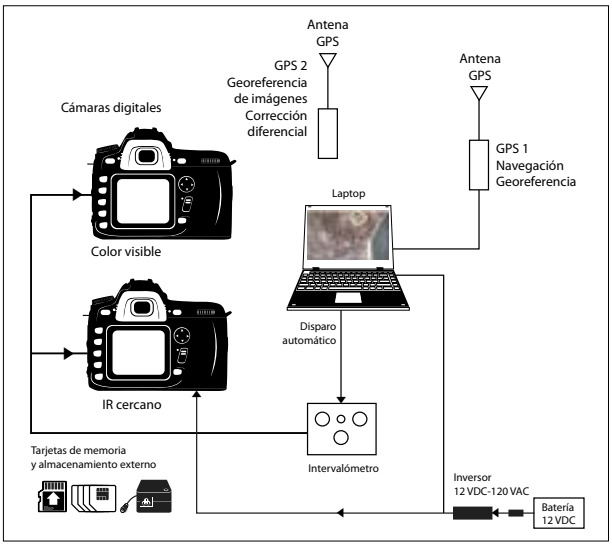


Figura 3. Diagrama de conexiones del equipo básico necesario para efectuar un levantamiento aéreo, con cámaras de pequeño formato en color e infrarrojo (IR).

principal efectuar tareas de navegación y determinar el momento de hacer una toma fotográfica. El GPS 2 provee las coordenadas geográficas del centro de la toma de cada imagen, dato importante en la formación de los mosaicos. Estos receptores son de bajo costo y tienen corrección WAAS (*Wide Area Augmentation System*), lo que significa que manejan un error de posicionamiento entre 3 y 9 m.

En la siguiente sección se describen algunos aspectos que se deben tener en cuenta al operar un sistema como el que aquí se menciona, para su mejor utilización y aprovechamiento.

Consideraciones para la obtención de imágenes aéreas

Antes de planear cualquier levantamiento aéreo, es indispensable tener en cuenta que los costos de una falla de alguno de los componentes clave del equipo, durante un levantamiento aerofotográfico, son elevados y uno de los objetivos primordiales debe ser el evitar un desperfecto que obligue a la cancelación del mismo. Por tanto, es primordial que el usuario considere tres modos de operación: automática, semiautomática y manual, esto permite que el operador tenga control de la situación en todo momento evitando una falla irrecuperable. En el modo automático, la computadora se encarga de calcular, de acuerdo con la posición geográfica, la velocidad, la sobreposición de las imágenes y la altura, el momento de disparo de la cámara; el usuario solo debe decidir el momento en que se comenzarán a adquirir las imágenes en cada línea de vuelo.

En el semiautomático, al enfrentar el usuario problemas durante el levantamiento, por ejemplo cuando el relieve es demasiado accidentado, que la altura de vuelo no se alcanza, o que hay un cambio inesperado de planes por cuestiones climáticas o de tráfico aéreo; en ese momento toma la decisión de controlar de manera independiente el intervalo de disparo para seguir cumpliendo básicamente con la cobertura y la sobreposición necesarias. La computadora almacena los datos de GPS de la posición geográfica de cada imagen y sigue dando el servicio de visualización general y a detalle, de la posición y avance del levantamiento. Es preferible evitar este modo de operación mediante la reconfiguración del levantamiento a través de un nuevo cálculo de los parámetros de vuelo. Más adelante se describe el funcionamiento de un programa de computadora desarrollado para este fin específico. También es muy útil contar a bordo con los datos de vuelo de los posibles escenarios en una hoja de cálculo para poder hacer el cómputo de la nueva cobertura y establecer de manera adecuada las nuevas coordenadas de cada línea de vuelo (Figura 5). Esto es crítico, ya que al cambiar la altura de vuelo varía el traslape original, lo que puede causar que no se cubra la zona de manera adecuada, quedando inclusive huecos en la cobertura o, por el contrario, repercutir en un exceso de imágenes.

El modo de operación manual es necesario en el momento en que ocurriera una falla grave al equipo, como por ejemplo, un error irrecuperable en la computadora. Se tiene la opción de operar la cámara con un intervalómetro y almacenar los datos de posición en la propia memoria del GPS; aunque los datos no van a quedar sincronizados con la obtención de la imagen, es posible después, con un programa realizado para esta aplicación, llamado "tiempo" (Bermúdez y Martínez, 2001) determinar los datos asociados a cada imagen. Una buena opción para hacer esta misma tarea es utilizar el programa Ozi Photo Tool® (OziPhoto Tool, 2012), que combina la información del GPS con los metadatos de las imágenes y se puede obtener de manera gratuita en Internet.

Lo más importante es no perder la oportunidad de realizar el levantamiento aéreo, con todos los costos que esto implica.

El plan de vuelo

Para la obtención de imágenes aéreas digitales de alta resolución con cámaras no métricas, se debe tener la misma sobreposición que con la fotografía aérea convencional, es decir, el 60 o 65% de manera longitudinal y el 30% entre líneas. Esto permite la obtención de estéreo pares que son indispensables en la fotoin-

terpretación, siendo esta una ventaja muy importante de la foto aérea digital con respecto a las imágenes de satélite, que en muchos casos no tienen esta disponibilidad. Es muy importante considerar la resolución que se necesita para resolver el problema que se afronta, generalmente, la tendencia es querer obtener un tamaño de píxel cada vez menor, sin embargo, hay que tomar en cuenta todos los factores involucrados. Un tamaño de píxel menor implica un mayor número de imágenes que procesar. Lo mismo pasa con la sobreposición, si ésta va más allá de los valores recomendados, se tendrá un exceso de imágenes y no necesariamente una cobertura óptima, porque hay que estar seleccionando y descartando determinadas imágenes al momento de formar las líneas para el mosaico. Además de la resolución espacial, también hay que considerar cuál es la resolución temporal (*i.e.* el tiempo entre levantamientos aéreos) más apropiada para dar seguimiento al fenómeno en estudio.

¿Cómo se calculan los parámetros de vuelo, resolución, altura, distancia entre líneas y coordenadas inicial y final de cada línea?

En la Figura 4 se muestra un esquema de la relación básica fundamental de cómo se forma la imagen al momento de hacer una toma fotográfica, cuando la cámara utiliza un sensor de imagen electrónico. En dicha figura se pueden apreciar las relaciones que existen entre: altura de vuelo, distancia focal del lente, cobertura de la fotografía en el terreno, tamaño de píxel en el sensor, y tamaño de píxel en el terreno (Neumann, 2005). Todos ellos, parámetros fundamentales para la planeación del levantamiento aéreo.

El primer paso es establecer el tamaño de píxel en el terreno, dato que permitirá llevar a buen término el proyecto en desarrollo. En caso de que haya alguna restricción en la altura de vuelo, se puede entonces establecer ésta como dato de entrada y calcular el tamaño de píxel.

Por semejanza de triángulos se tienen:

$$\frac{f}{H} = \frac{Pixel\mu}{Res} \qquad (1)$$

donde:

f = distancia focal calibrada,
H = altura de vuelo,
$Píxel\ \mu$ = tamaño de píxel en el sensor,
Res = tamaño de píxel en el terreno.

Despejando, se tiene que el tamaño de píxel en el terreno es:

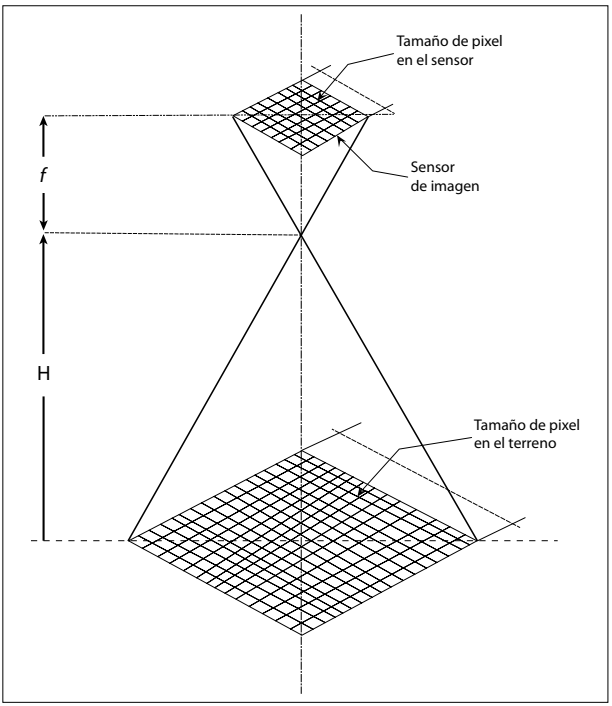


Figura 4. Relaciones fundamentales que existen durante la toma de la imagen con un sensor electrónico, desde una estación remota.

$$Res = Pixel\mu \left(\frac{H}{f}\right) \tag{1a}$$

Y la altura de vuelo se puede calcular con la ecuación:

$$H = f \left(\frac{Res}{Pixel\mu}\right) \tag{1b}$$

La distancia focal calibrada se obtiene en el laboratorio mediante el método descrito en la sección sobre *calibración de la cámara,* mientras que el tamaño de píxel del sensor es un dato que nos proporciona el fabricante y está dado en micras, usualmente dentro de un intervalo de 6 a 12.4 m. Una vez establecido el tamaño de píxel en el terreno, es muy sencillo multiplicar este valor (en metros), por el número total de píxeles en cada fila y cada columna del sensor, y de esta manera obtener la cobertura sobre el terreno de cada imagen. Usualmente se coloca la parte ancha del sensor de manera perpendicular a la línea de vuelo para aumentar la cobertura y disminuir el número de transectos.

Con la cobertura horizontal sobre el terreno (Ater) y la información del traslape entre líneas (30%), es posible establecer la separación entre cada una de ellas, de esta manera la distancia entre líneas (Interlin) se obtiene al multiplicar (Ater) x (1 - 0.3) = Interlin. Asimismo, la distancia que recorre la nave para hacer una nueva toma es Av = Hter x (1 - 0.6) considerando un traslape entre imágenes de 60% y que Hter es la cobertura vertical sobre el terreno. El número de líneas se obtiene al dividir el ancho de la zona de vuelo (Wi) entre la distancia entre líneas. El número de imágenes por línea se obtiene al dividir el largo de la zona de vuelo (Lg) entre la distancia Av. A partir de esta información y las coordenadas extremas de la zona se establecen todas las líneas de vuelo.

En la siguiente sección se hace referencia a un programa que ha sido desarrollado en el Instituto de Geografía para llevar a cabo todos estos cálculos a partir de los parámetros básicos del levantamiento (Bermúdez y Martínez, 2001). Sin embargo, el contar con una hoja de cálculo, proporciona un respaldo importante en caso de falla de la computadora, ya que se puede traer a bordo en una Palm® u otro dispositivo similar, para reducir la posibilidad de no cubrir adecuadamente la zona. Un ejemplo de una hoja de cálculo, desarrollada también en el Instituto de Geografía, se muestra en la Figura 5. La facilidad de introducir los nuevos parámetros y su cálculo inmediato hace de este programa una herramienta muy valiosa.

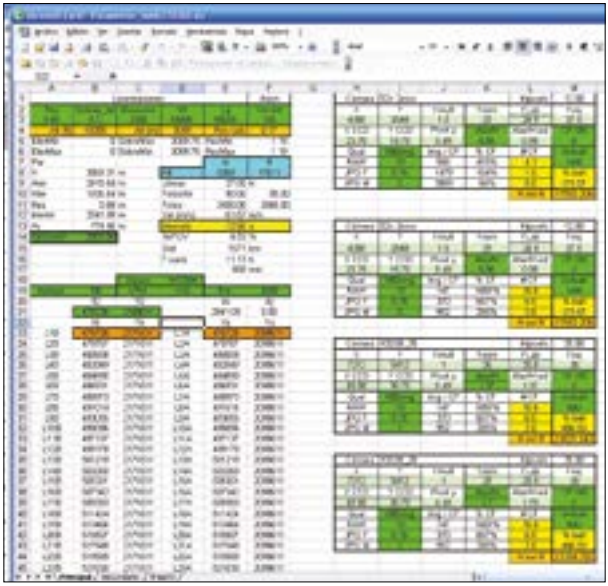


Figura 5. Hoja de cálculo para reconfigurar de manera rápida los nuevos parámetros de vuelo en caso de cambios de último momento, o durante el mismo levantamiento.

En la parte superior izquierda de esta hoja de cálculo se encuentran los datos del plan de vuelo, marcados en color verde, que deben ser introducidos por el usuario. La resolución del píxel en el terreno; Res = 0.68 m, la sobreposición lateral; Sobrep_lat = 0.3, la elevación media del terreno de la zona del levantamiento; elevación = 2 300 (a nivel del mar es cero), el ancho de la zona de vuelo; Wi = 54 000 m, el largo de la misma; Lg = 69 000 m y la velocidad de la aeronave; Vel kts = 120 nudos. En color naranja se indica la altura de vuelo en pies y en metros, y la resolución del píxel en el terreno. En la columna A y hacia la derecha (columnas B, C, D, E, F) se indican elev min y elev max; las elevaciones mínima y máxima del terreno en la zona del levantamiento. Con estos datos se calcula la sobreposición max y min, esto sirve para saber si va a haber algunos huecos en el cubrimiento. También se calculan las resoluciones en el terreno mínima y máxima: res min y res max. Continuando en la columna A, la variable H es la altura de vuelo en metros, Ater es la cobertura horizontal de la imagen en el terreno, Hter es la cobertura de la imagen sobre el terreno en la dirección del vuelo, Res es el tamaño del píxel en el terreno, Interlin es la distancia entre líneas, Av es la distancia que se recorre para tomar una nueva fotografía. Obturador es la velocidad de disparo de la cámara. En la fila azul se indica nuevamente la altura de vuelo en pies y en metros y debajo de ella el número de líneas, las fotos por línea y la cantidad total de fotos, y finalmente, la velocidad de la nave en metros sobre segundo. En la fila amarilla se indica el intervalo de disparo de la cámara en segundos, la distancia total de vuelo, considerando los giros para retomar la siguiente línea, y el tiempo total estimado del mismo.

En la parte baja y del lado izquierdo de la hoja de cálculo hay que establecer el azimut con el que iniciará el levantamiento y la zona UTM. En la fila de abajo hay que definir las coordenadas de la esquina superior izquierda de la zona en estudio (X_0, Y_0). Cuando la variable dx es positiva las líneas de vuelo se continuarán hacia el este, a partir de la coordenada inicial. Las coordenadas del punto de inicio y fin de la primera línea (L1B, L1A) se obtienen a través de una relación trigonométrica como: B23=B21+(F19*SENO(RADIANES(B19+180))) y las coordenadas de las demás líneas de vuelo por medio de incrementos, como por ejemplo B24=B23+E21. Por último, en la parte derecha se encuentran los parámetros de las diferentes cámaras que se tienen disponibles para hacer los levantamientos, con distintas combinaciones de lentes.

Otra manera diferente y más simple de planear el vuelo y visualizar los transectos ya efectuados, sobre un mapa base, es a través del programa Map Source de GARMIN®. Éste permite trazar las líneas de vuelo sobre un mapa y además cargarlas en un GPS para llevar a cabo la campaña aérea, y en segundo lugar, des-

cargar los recorridos (*tracks*) efectuados y compararlos contra las líneas de vuelo planeadas (Figura 6).

Captura de imágenes

Para este proceso es ampliamente recomendable contar con una plataforma estabilizada, ya sea dentro o fuera de la aeronave. Esto permite lograr que las fotografías sean tomadas de manera vertical, lo que ayuda a reducir parte de las distorsiones causadas por los movimientos inevitables que sufre la aeronave al realizar los transectos sobre la zona en estudio. Algunos autores han desarrollado sus propias plataformas estabilizadas (Hui-Sheng y Li-Min, 2010; Jiang y Qi, 2009; Prado *et al.*, 2006) y algunos otros utilizan las convencionales de cámaras aerofotográficas adaptadas para las de pequeño formato para lograr el mismo propósito. Las plataformas aéreas estabilizadas son deseables, mas no indispensables, se puede llevar a cabo un levantamiento aéreo prescindiendo de estos dispositivos. Lo mismo se puede decir de las unidades de medición inercial, que proporcionan los ángulos de orientación de cada imagen (Prado *et al.*, 2006), en

Figura 6. Visualización del proyecto con el programa Map Source, donde se aprecia el plan de vuelo completo y las líneas que ya han sido cubiertas en una primera etapa de trabajo.

la mayoría de los casos su alto costo las hace prohibitivas y esto va en contra de la filosofía de la utilización de la imagen aérea digital de pequeño formato, cuya principal característica es el bajo costo.

Por otra parte, también es recomendable tener a bordo un programa de apoyo para el monitoreo y el manejo del proceso de obtención de las imágenes, particularmente cuando se efectúan vuelos de varias horas, situación que es muy deseable para aprovechar las condiciones favorables del tiempo. El cansancio y las condiciones ambientales adversas, como la falta de oxígeno a alturas de vuelo a 12 000 pies o mayores, causan que el operador pueda perder la cuenta de las líneas ya realizadas, situación que se acentúa si por alguna razón tuvo que abandonar y retomar una o más de las líneas, por cuestiones de fallas de equipo o de tráfico aéreo. Un programa de monitoreo como el que se presenta enseguida, es utilizado para llevar a cabo la planeación del vuelo y efectuar un seguimiento durante la campaña aérea (Bermúdez y Martínez, 2001). Éste ha sido escrito en *Visual Basic* y representa una mejoría importante en cuanto a eficiencia en lo que a captura de imágenes se refiere. Este programa permite almacenar y desplegar en pantalla un mapa base, una imagen de satélite o algún otro elemento cartográfico como apoyo durante la realización del vuelo. Esto posibilita el ubicar geográficamente de una manera rápida al operador dentro de la zona de vuelo (Figura 7).

En la etapa de planeación se deben introducir los datos básicos del vuelo como: resolución sobre el terreno, altura de vuelo, número de píxeles de la cámara, traslape longitudinal y entre líneas, el mapa base de referencia, la distancia focal calibrada, las coordenadas extremas de la zona de vuelo, etcétera.

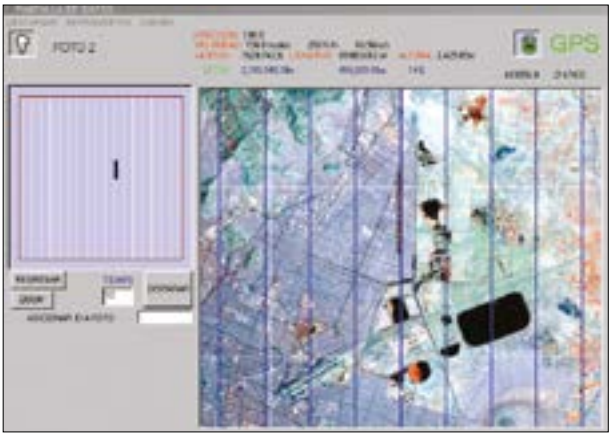


Figura 7. Pantalla de modo de vuelo donde se monitorean las variables más importantes y se grafican en la parte izquierda los transectos ya volados.

Una vez introducidos todos los elementos necesarios, el programa calcula y traza las líneas de vuelo sobre el mapa base. Estas mismas líneas pueden introducirse al GPS como referencia para el piloto durante el levantamiento. En esta misma pantalla se despliega la información vital del levantamiento (Figura 7), las coordenadas de la posición geográfica son continuamente actualizadas y utilizadas para el disparo de las cámaras, se va desplegando en tiempo real el recorrido y a la izquierda aparecen las líneas que ya han sido voladas y se muestra, en caso de que así ocurra, algún segmento que esté faltando en alguna línea. Esto queda inequívocamente señalado de manera gráfica, lo que permite retomar posteriormente el tramo faltante para completar con éxito el cubrimiento. Los datos de la velocidad de la nave y la posición geográfica, adquiridos por el receptor GPS 1 que se lleva a bordo, son utilizados para desplegar en tiempo real la posición, sobre la cartografía base y en el momento que ocurre un disparo de la cámara, se almacena el dato de la coordenada geográfica y la hora, para que posteriormente se pueda determinar la secuencia y ocurrencia de la toma de cada imagen, teniendo entonces una sincronización que evita problemas al momento de formar las líneas del mosaico. Esto es vital, en caso de zonas donde no existen detalles fácilmente distinguibles del terreno o cuando se ha perdido la secuencia de las líneas de vuelo.

Calibración de la cámara

Las cámaras de formato pequeño ofrecen una manera de obtener imágenes aéreas a bajo costo, siendo en la gran mayoría de los casos equipos que no han sido diseñados con propiedades métricas. Éstas se caracterizan por no contar con marcas fiduciales y tener en algunos casos, lentes con distorsiones relativamente grandes. La calibración es necesaria para compensar los errores sistemáticos que se producen en ellas. La distorsión generada en el sensor de imagen es constante y puede ser determinada estableciendo marcas fiduciales virtuales, además, como su geometría es muy estable y todos los píxeles están localizados prácticamente en un plano, esta consistencia permite una fácil determinación de sus parámetros geométricos. En un sentido amplio, todos los píxeles pueden considerarse como marcas fiduciales representando referencias de posición para la localización del punto principal y de cualquier otro objeto en la imagen (Wolf y Dewit, 2000).

Dentro de los parámetros de orientación interna, la distancia focal calibrada se obtiene al encontrar la separación entre el punto nodal posterior del lente y el punto principal en la imagen, definiendo a este último como el lugar donde se localiza el centro real de la imagen; en la siguiente sección se describe una manera

práctica de obtenerla. La distorsión radial simétrica es aquella componente que ocurre a lo largo de líneas radiales a partir del punto principal, ésta se presenta teóricamente en todos los lentes, aun cuando hayan sido manufacturados bajo especificaciones precisas (*Ibid*.).

Método de calibración empleado

Para determinar las distorsiones que el lente le introduce a la imagen, es necesario modelar el error. Una de las maneras más sencilla de hacerlo, es ajustando los valores a un polinomio. Al efectuar las mediciones de las distorsiones sobre la fotografía es posible obtener los coeficientes de dicho polinomio. Básicamente hay que obtener una distancia desde el centro de la imagen y su valor correspondiente de distorsión. Es necesario cuantificar las diferencias que existen entre las posiciones reales de los puntos sobre la imagen y aquéllos que tendrían, si existiera una proyección exacta sobre el sensor de imagen. Con esta información inicial, es posible llevar a cabo el procedimiento de calibración de la cámara y posteriormente el de la corrección geométrica de las imágenes (Figura 8).

Para hacer la calibración se utilizó un patrón con una cuadrícula regular, colocado de manera perpendicular el eje óptico de la cámara y se tomó una fotografía; alineando en un mismo eje el centro de la cuadrícula y el centro del lente de la cámara (Figura 8). En este caso se utilizó una cámara fotográfica SONY modelo DSC-F707. Se midieron las distancias con una cinta métrica, desde el plano

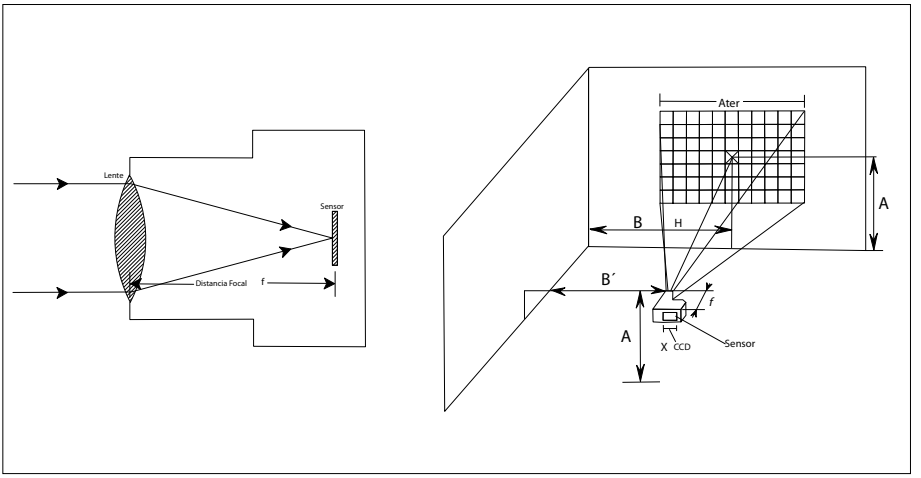


Figura 8. Arreglo utilizado para la calibración de la cámara y medidas realizadas para calcular la distancia focal real del lente.

focal hacia el lente y hacia el patrón de pruebas; corroborando que existiera la misma altura entre el eje óptico de la cámara con el centro de la imagen (A = A'). Para calcular la distancia focal real del lente, por semejanza de triángulos, se utilizó la ecuación (2). Los parámetros son similares a los descritos en la sección sobre *planeación del vuelo*, con la salvedad de que en este caso si se tienen las dimensiones del ancho y alto de la cuadrícula, que sería el equivalente a la cobertura sobre el terreno:

$$\frac{f}{H} = \frac{X_{CCD}}{Ater} \tag{2}$$

donde:

f es la distancia focal,
H es la distancia al objeto (altura de vuelo),
X_{CCD} es el ancho del sensor,
Ater es el ancho del patrón de pruebas (cobertura horizontal de la imagen sobre el terreno).

Otra manera práctica de obtener la distancia focal verdadera, es tomando una fotografía desde una aeronave hacia una superficie de la que se conocen sus dimensiones y comprobando el cubrimiento. Empleando la ecuación (1) se puede despejar y calcular este parámetro.

Para determinar qué tanta desviación presenta la imagen, una vez tomada la fotografía se sobrepone a ésta la cuadrícula patrón, y se hacen las mediciones correspondientes partiendo del centro de la fotografía en dirección hacia los bordes. Se necesita un mínimo de cuatro mediciones, teniendo en cuenta que con una mayor cantidad de éstas, la exactitud del polinomio para modelar la distorsión, aumenta. Pero en este último caso, como se tiene un número mayor de ecuaciones que de incógnitas, entonces en necesario utilizar un método de mínimos cuadrados para obtener una solución única.

La ecuación que sirve para modelar la distorsión (*Ibid.*) es la siguiente:

$$\Delta r = k_1 r^1 + k_2 r^3 + k_3 r^5 + k_4 r^7 \tag{3}$$

donde:

Δr es la distorsión radial simétrica del lente,

r es la distancia radial medida desde el punto principal,

k_1, k_2, k_3 y k_4 son los coeficientes del polinomio.

En la Figura 9 se observa una diferencia muy clara entre la fotografía y la malla-patrón, la distorsión es principalmente radial simétrica.

Se desarrolló un programa para esta aplicación específica (Hernández, 2003), que obtiene los valores de las k's y el polinomio que modela la distorsión. A partir de esta información se hace la corrección por distorsión en las imágenes.

La desviación del eje óptico, el último de los elementos de orientación interna que nos falta, se obtiene a través de la medición directa que se hace sobre la imagen; es decir, se establece la diferencia de posición que tiene el centro de la retícula patrón y su ubicación real en la imagen digital. Con los elementos de orientación interna completos, se procede a la corrección geométrica de las imágenes.

Corrección geométrica

Durante este proceso es importante mencionar que el ajuste por desplazamiento del punto principal es aplicado en conjunto con la corrección de la distorsión del lente; de esta manera se logran corregir geométricamente las imágenes, eliminando las deformaciones producidas por la cámara (*Ibid.*).

A partir de una imagen original con distorsiones (Figura 9), se procede a la corrección de la misma (Figura 10). El programa encargado de esta tarea hace los cálculos para reacomodar cada uno de los píxeles, es decir, se hace un corrimiento para que dicha imagen quede corregida. Se obtiene la distancia desde el origen de coordenadas, para ese píxel en específico, y junto con él se calcula

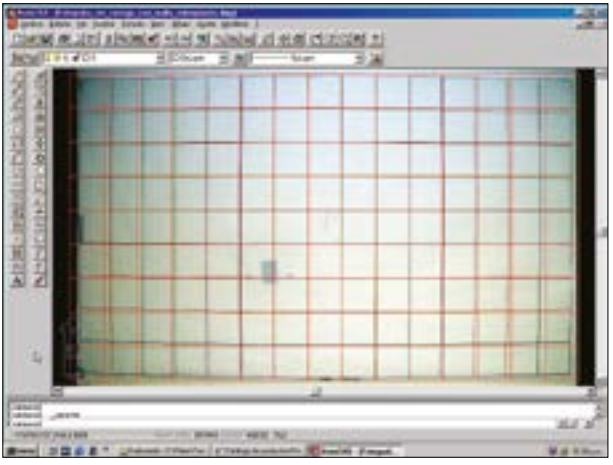


Figura 9. Una vez empalmadas la fotografía y la malla patrón, se efectúan mediciones para determinar las magnitudes de las distorsiones del lente.

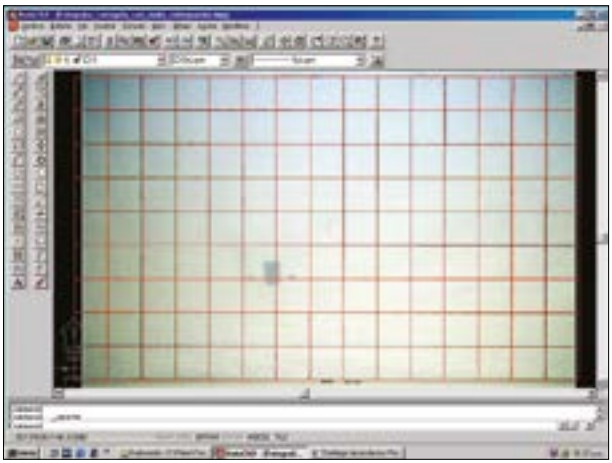


Figura 10. Imagen corregida geométricamente.

un valor de desplazamiento, para ello se efectúa la medición tomando en cuenta donde está el píxel y dónde debería estar. Finalmente se hace un reacomodo en una nueva matriz-imagen vacía para introducir, conforme se van calculando, los valores correspondientes de RGB para cada elemento y con ello conformar la imagen ya corregida.

La metodología descrita en esta sección se puede aplicar a cualquier conjunto de cámara y lente de formato pequeño, sin embargo, los resultados pueden variar considerablemente entre una combinación y otra. Se recomienda usar lentes de buena calidad para disminuir las distorsiones. El ejemplo mostrado aquí se llevó a cabo con un lente de una cámara SONY modelo DSC-F707, la distorsión máxima fue de 31 píxeles, mientras que en una prueba efectuada con cámaras NIKON D2x y D3x con lentes NIKKOR 35 mm OD-AF y Carl Zeiss ZF 25 mm, se tuvo un error de 0.4 píxeles, es decir, que no mostraron distorsión corregible. Para conseguir el mismo propósito, de hacer la calibración y efectuar la corrección geométrica de las imágenes, existen algunos programas que pueden conseguirse de manera gratuita o a bajo costo en Internet, como el PT lens (PT-Lens, 2012), o el DxO (DxO Laboratories, 2012) que cumplen satisfactoriamente con esta función. Entre otras opciones están: el programa PhotoShop Creative Suite CS5 (PhotoShop CS5, 2012) y el Camera Calibration Toolbox for Matlab (CCT_Matlab, 2012).

El llevar a cabo la corrección geométrica de las imágenes es indispensable para reducir el error en cada fotografía individual y, por tanto, en el mosaico

ortorectificado; ya que los objetos se encontrarán en una posición más cercana a la realidad.

Formación de mosaicos ortorectificados

Procesamiento de imágenes

Una vez que el vuelo se ha realizado, las imágenes originales son respaldadas, rotadas, re-etiquetadas y renombradas. Se mejoran el contraste, el brillo y el balance de color, a través de la manipulación del histograma, asegurando que en cada paso las características del terreno sean resaltadas. La vegetación es ajustada, evitando la exageración de los colores y la introducción de artefactos en las imágenes. La función gradiente es aplicada para reducir las diferencias en la iluminación debido a los inevitables retrasos que ocurren entre líneas de vuelo durante la campaña aérea. Con estos procedimientos se obtienen imágenes con mejores características para llevar a cabo una interpretación más precisa.

Generación de mosaicos ortorectificados

Una vez que las imágenes de pequeño formato han sido clasificadas, mejoradas y corregidas geométricamente, se procede a la formación de los mosaicos. En esta sección se explica brevemente la manera en que se lleva a cabo el proceso de construcción de bloques georreferenciados, la obtención de puntos de control y de amarre y, finalmente, la ortocorrección del mosaico. Todo esto utilizando el programa ERDAS Orthobase™. Una referencia más completa de la manera de efectuar este proceso de formación de mosaicos, se puede consultar en Ramírez (2011). Los ángulos de rotación (omega, phi, kappa) al momento de adquirir cada imagen no se conocen, ya que por lo general no usamos una unidad de medición inercial que los proporcione. Por otro lado, los puntos de control terrestre son obtenidos regularmente de ortofotos digitales de INEGI (2012a), que dependiendo de la disponibilidad, tienen un tamaño de píxel de 3.0, 1.5, 0.75, 0.3, 0.15 o 0.075 m, con exactitud horizontal de 12.2, 6.1, 3.0, 1.2, 0.6 y 0.3 m, respectivamente (INEGI, 2012b). La cobertura promedio de las ortofotos es de 11.7 x 13.8 km^2. Aunque también se pueden utilizar para este mismo propósito otras fuentes de información, como las imágenes de satélite. Es importante mencionar que el programa de ortocorrección entrega valores de error cuadrático medio (RMS) en cada paso, por ejemplo, inmediatamente después de efectuar la aerotriangulación, y esta información se toma en cuenta para hacer ajustes durante este proceso.

Preparación del sistema. Directorios e imágenes que se utilizarán

En principio hay que establecer el directorio de imágenes en c:/ , verificar que el programa cuente con el módulo orthobase y establecer en las preferencias, la asignación de bandas espectrales para las imágenes tipo SPOT, de modo que para la banda roja ("SPOT red band default") se utilice la banda #1, para la verde, la banda #2 y para la azul, la banda #3. Esto es para que las imágenes digitales en color (JPG o TIF) se visualicen correctamente. En un siguiente paso, cambiar en la categoría "TIFF images" marcar la casilla correspondiente a "Edits allowed", para que en los proyectos ERDAS pueda modificarlas y crear capas de "pirámides". Las pirámides son archivos auxiliares que contienen la misma imagen, con distintas resoluciones, para que su despliegue sea más rápido cuando se utilizan distintas amplificaciones mediante el "zoom". Esto es importante al trabajar con los bloques para ortocorrección, ya que es preciso cambiar con mucha frecuencia las imágenes desplegadas y también variar la amplificación con que se muestran. Finalmente, hacer clic en los botones "User sabe" y "Global sabe" y cerrar la ventana.

Crear un nuevo proyecto, establecer el sistema de referencia geográfico y los ángulos de rotación de las imágenes

1. Hacer clic en el botón "Orthobase". Seleccionar la opción "Create New Orthobase Project" y asignarle un nombre. Este archivo se distinguirá en el directorio de trabajo por su extensión ".blk".
2. En "Geometric model", seleccionar la opción "Digital camera" y hacer clic en "Ok".
3. En la ventana "Set reference system" que aparece a continuación, seleccionar en ceja "Custom" la proyección UTM, el Datum WGS84 y la zona UTM 14 Norte (este dato cambia acorde con la zona del proyecto). Hacer clic en "Ok" y luego en "Next".
4. Seleccionar metros como unidades de referencia horizontales y verticales, y grados para los ángulos.
5. Seleccionar la opción "Omega, Phi, Kappa" para el sistema de rotación y "Z-axis for normal images" para la dirección de las fotos. Esta es la configuración para fotos aéreas verticales. Hacer clic en "Ok". Aunque no se hayan obtenido los ángulos de orientación, cuando no se cuente con una unidad de medición inercial, es necesario declararlos en este momento. Después se les asignará un valor de cero, para que pueda correr el proceso.

6. En la tabla que aparece, utilizar el icono para agregar fotos y seleccionar las imágenes que se encuentran en el subdirectorio "Fotos".
7. Una vez introducidas las imágenes, ir a la primera de ellas y colocar el indicador ">" en el cuadro correspondiente de la misma columna ">".
8. Hacer clic en el icono con la letra "i". En el cuadro que aparece, seleccionar el sensor haciendo clic en "New" y luego en "Load". Seleccionar el tipo de cámara que se usó en el levantamiento, en este caso: Nikon D3x. Llenar los espacios de distancia focal y la desviación del eje óptico de la cámara, obtenidos de la calibración previa.
9. En la ceja "Interior orientation", introducir 5.49 micras para el tamaño del píxel, tanto en X como en Y. No entrar en la ceja "Exterior orientation", porque no se tienen los datos de los ángulos de cada toma fotográfica y pone ceros por default. Hacer clic en "Next" sucesivamente para transferir a la siguiente imagen los valores de sensor y tamaño de píxel.
10. Guarde el bloque con "Save" como precaución.

Ahora ya se tienen todas las imágenes con que se va a trabajar un primer bloque del mosaico.

Obtención de puntos de control

Son indispensables y particularmente importantes cuando no se obtienen los ángulos de orientación de cada fotografía, ya que a partir de estos puntos de control es posible reconstruir las condiciones geométricas de las fotografías, esto se lleva a cabo durante el proceso de aerotriangulación. Los puntos de control (GCP's) deben ser elementos identificables en la superficie terrestre (calles, banquetas, árboles, puentes, etc.) que tienen coordenadas conocidas (X, Y, Z); por tanto, sirven para establecer una relación exacta entre las imágenes obtenidas por la cámara y el terreno, proceso conocido como georreferencia. Un punto de amarre puede o no tener coordenadas de terreno conocidas, pero se reconoce visualmente en el área de traslape entre dos o más fotografías.

Para obtener los puntos de control es necesario contar con mapas, ortofotos o imágenes de satélite. Esta base cartográfica es muy importante ya que el resultado final de la ortorectificación de nuestro mosaico dependerá de la exactitud con que se ubiquen los puntos. También es muy importante que todos los mapas tengan la misma proyección cartográfica, esferoide, datum y unidades de medición (metros, grados), para evitar errores e inconsistencias en los resultados. Otro dato importante es la referencia de alturas de cada punto de control. Éstas se obtienen a partir de un modelo digital de elevación (DEM), que es una capa de información

de datos raster que permitirá eliminar el efecto de desplazamiento del relieve en las imágenes, al conocerse la altura de cada píxel en el terreno (Figura 11).

1. Para iniciar este proceso, abrir la ventana de introducción de puntos de control ("Point measurement tool"). Es el icono que tiene un signo "+" con dos flechas circulares alrededor, que servirá posteriormente para generar puntos de amarre de modo automático.
2. Active las dos casillas indicadas por el signo "+" y por una "Z", para obtener directamente el valor de elevación de cada punto a partir del (MDE) y para desplazarse automáticamente a la posición estimada de los puntos en cada imagen.

Para introducir puntos de control nuevos, haga clic en "Add". Busque un punto específico en la imagen de referencia y en la foto digital en color y márquelo haciendo *clic* en la ventana inferior, y afine su posición en la ventana superior de zoom. No olvide crear un punto nuevo para cada nueva posición. Es un error común introducir marcas en diferentes imágenes sin crear puntos nuevos, provocando que un solo punto tenga coordenadas de distintos objetos en distintas imágenes, dando lugar a errores grandes y de difícil detección. Debe haber al menos tres puntos de control por imagen.

Para crear puntos de amarre, simplemente busque el mismo objeto en las imágenes sucesivas en que éste aparezca y no lo marque en la imagen de referencia.

Figura 11. Obtención de puntos de control terrestre. En la parte izquierda se encuentra la cartografía base y en el lado derecho la imagen donde se están marcando los puntos.

Aerotriangulación

La triangulación es el proceso por el cual se define la relación matemática entre un bloque de imágenes, el sensor y el terreno. Una vez definida esa relación geométrica, es posible crear imágenes e información precisa con respecto a la superficie terrestre. Es durante este proceso que se completan los parámetros de orientación externa que no se tienen (omega, phi, kappa).

La triangulación en bloque considera simultáneamente lo siguiente:

- La posición (X, Y, Z) y la orientación (omega, phi, kappa) de cada imagen en un bloque, tal y como existía al momento de la toma (estos son los parámetros de orientación externa).
- Las coordenadas X, Y, Z de los puntos de amarre capturados del bloque de imágenes. Que posteriormente también se convierten en puntos de control.
- Los parámetros de orientación interna, asociados a la cámara: distancia focal calibrada, desviación del eje óptico y distorsiones en el lente.
- Parámetros adicionales que caracterizan errores sistemáticos en el bloque de imágenes.

1. Cuando tenga al menos tres puntos de control en cada una de las imágenes, oprima el botón para efectuar la triangulación (triángulo azul en la Figura 13). Si se requiere de más puntos, el programa lo indicará, especificando la imagen en la que hacen falta.
2. Revise el resultado de la triangulación y evalúe la conveniencia de introducir más puntos de control o de amarre. Verifique si la triangulación converge y cuál es el valor del error cuadrático medio (RMS), que es la distancia entre la ubicación de entrada de un punto de control (la que proviene del mapa de referencia) y la ubicación de salida del mismo punto, o bien, la diferencia entre la coordenada real del punto de control y la coordenada deseada de salida (Figura 12). Si este número es elevado, se debe buscar dónde ocurrieron los errores, corregirlos e introducir más puntos de amarre. Dependiendo de las características de cada proyecto, el objetivo es lograr un error menor a 1 píxel, esto es para tener un posicionamiento lo mejor posible de los objetos dentro del mapa, aunque en algunos casos es difícil lograr que sea menor a 5 o 6 píxeles en zonas montañosas. Esto se debe a que las distorsiones son mayores en esta área y por tanto, difíciles de compensar, aunado al nivel de error del modelo digital de elevación utilizado (imagen raster con tamaño de píxel de 30 m).

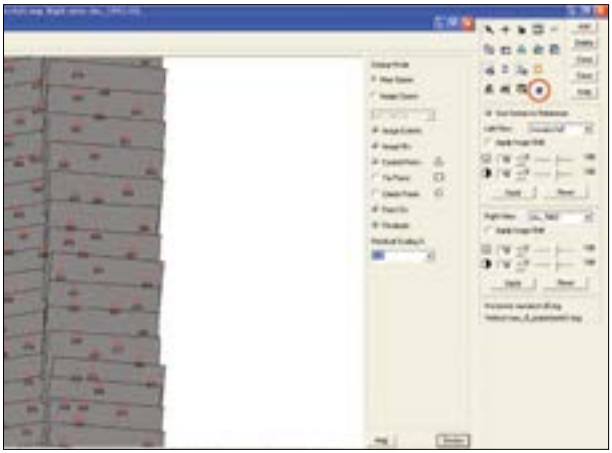


Figura 12. Después de correr la triangulación se obtiene un estimado del error (RMS) que tendrá el mosaico terminado.

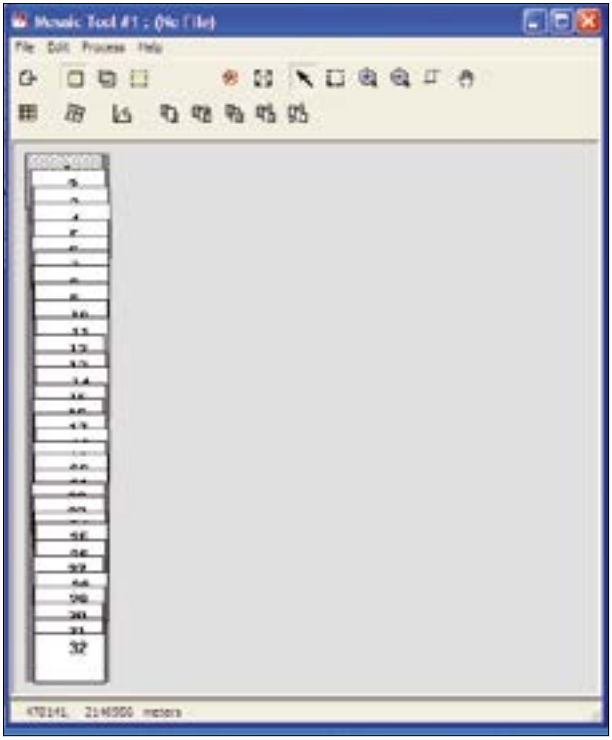


Figura 13. Creación de mosaicos por línea de vuelo.

3. Cuando la triangulación converge, el error está dentro de lo aceptable y el despliegue gráfico de las imágenes las muestra sin grandes deformaciones; entonces puede procederse a la generación de las ortofotos.

Ortocorrección de imágenes

La ortorectificación u ortocorrección consiste en cambiar la proyección central de la imagen de una superficie, en líneas de proyección perpendiculares (proyección ortogonal), eliminando la distorsión causada por las variaciones del terreno fotografiado. El resultado se conoce como ortoimagen u ortofotografía. En este paso se hace la ortocorrección a cada imagen individual.

1. Activar el icono de ortorectificación, aparecerá una ventana con las opciones de "salida simple" y "salida múltiple", seleccionar la primera. También hay que elegir el archivo de salida y el método de remuestreo. El programa proporciona un tamaño aproximado del píxel de salida (*Ouput cell sizes*); entre más pequeño es el píxel, más grande será el tamaño del archivo de salida. En el botón de "DEM, Overlap Threshold", seleccionar: sobreposición al 30%. Activar el botón "OK" para comenzar con el proceso de creación de imágenes ortorectificadas. Al terminar, se activará una ventana con el siguiente diálogo: "JOB STATUS al 100%", esto indica que se terminó exitosamente el proceso. Seleccionar "OK" para concluir con esta etapa.

Creación de mosaicos de cada una de las líneas de vuelo

1. En el menú principal de ERDAS, seleccionar el módulo llamado "Data Drep". Elegir la opción "Mosaic image"; ésta abrirá una ventana de trabajo para agregar las imágenes ortorectificadas. Es importante conservar el orden en el cual fueron colocadas en nuestro proyecto. Enseguida activar la acción "Run process" y dar un destino a nuestro archivo de salida. Una vez terminado el proceso, aparecerá el diálogo "JOB STATUS al 100%", entonces se seleccionará "OK". Para verificar el resultado, abrimos el archivo creado, en nuestro visor.

Generación del mosaico final

Cuando se han creado los mosaicos de todas las líneas de vuelo, es posible generar el ortomosaico final. Este proceso consta de la unión de todas nuestras líneas de vuelo para formar una sola imagen de nuestra área en estudio (Figura 14).

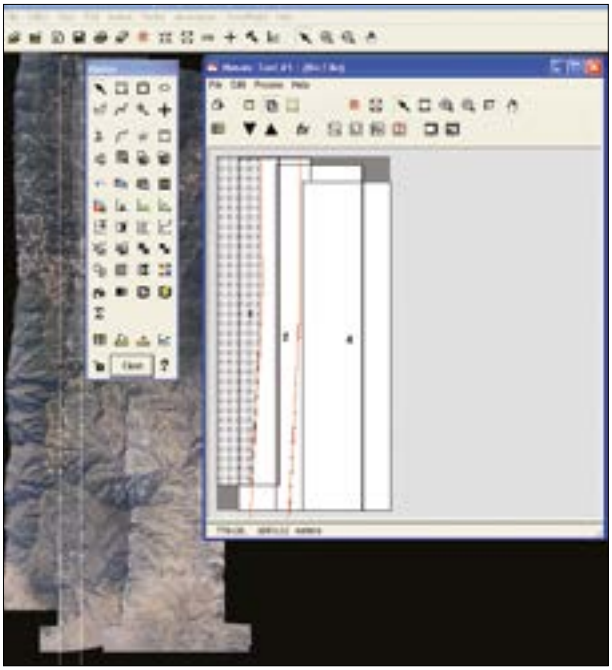


Figura 14. Generación del ortomosaico final. Todas las líneas deben ajustarse antes de ejecutar el proceso.

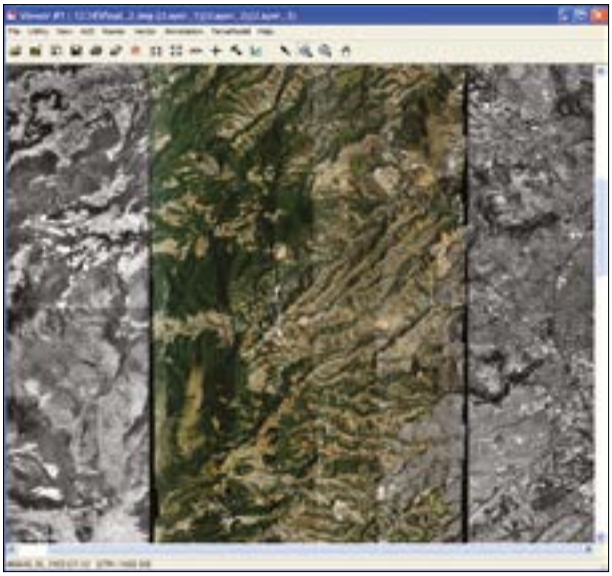


Figura 15. Una porción del mosaico generado con el programa ERDAS OrtoBASE™. En ambos lados se encuentran las ortoimágenes digitales de INEGI, usadas como cartografía base.

1. En el menú principal abrir una ventana o visualizador de imágenes, cargar los mosaicos con las respectivas líneas de vuelo para verificar su posición con respecto al mapa de referencia. Si existen deformaciones, se puede intentar reducirlas ordenando y reacomodando las líneas para que ajusten.
2. Cuando están las líneas ajustadas y en el orden correcto, se elige la opción "raster" y se activa en submenú "Tools"; éste mostrará una ventana con herramientas, de la cual hay que elegir la de "corte"; ahí se marcará lo que se considere con menor desplazamiento o deformación, para hacer coincidir las líneas.
3. En la ventana de "creación de mosaico" se agregan los archivos o mosaicos por línea.
4. En este caso se elige la opción de corte que nos permitió importar los vectores. Al activarse ésta, se tendrá que seleccionar uno a la vez, interactuando con esta ventana hasta recopilarlos todos, entonces es posible correr el proceso de creación de mosaico "Run mosaic".

Discusión

Contra la opinión de algunos autores (Graham y Mills, 2000) se ha demostrado la factibilidad de llevar a cabo levantamientos aéreos de amplias zonas (*e.g.* 3 600 km^2) utilizando cámaras de formato pequeño, con un tamaño de píxel en el terreno de 0.5 m, con un error RMS en posicionamiento en horizontal de 5 a 6 m, incrementándose de manera sensible en zonas montañosas. En la Figura 16 se muestra un mosaico en visible y otro formado con imágenes compuestas en falso color que representan un cubrimiento de 3 657 km^2 de la Cuenca de México.

Los modelos digitales de elevación utilizados en la mayoría de nuestros proyectos para la formación de los ortomosaicos, son proporcionados por INEGI a través del continuo de elevación, que tiene un valor de 30 m por píxel (INEGI, 2012c). Las coordenadas geográficas del centro de cada toma se adquieren a través de un receptor de posicionamiento satelital de bajo costo con corrección WAAS, esto implica que se tiene un error de 3 a 9 m, dependiendo de las condiciones ionosféricas, principalmente, y de la distribución espacial de los satélites. Solamente en ciertos proyectos se ha utilizado corrección diferencial con receptores geodésicos (Prado y Peralta, 2005; Prado *et al.*, 2012) para obtener puntos de control con precisión de 1.5 cm. Los errores de posicionamiento en X y Y de los píxeles en los mosaicos, han sido de 45 cm. Este valor es significativamente

Figura 16. Ortomosaico del Distrito Federal, compuesto por 2 160 imágenes obtenidas en 2010, efectuando 24 líneas de vuelo de 70 km de largo cada una.

menor que en otros casos (*i.e.* 5 o 6 m), esto ha sido a expensas de llevar a cabo costosas campañas de obtención de puntos GPS en campo.

Un factor muy importante para lograr un error aceptable en la generación de los ortomosaicos son las ortofotos de INEGI, que proporcionan los puntos de control terrestre para georreferenciar y efectuar la aerotriangulación. Otro elemento esencial para mantener el error reducido es el uso del programa ERDAS OrtoBASE™, a través de sus procesos bien establecidos y su flexibilidad operativa. Este programa proporciona el valor RMS del error, que se toma como referencia para establecer la precisión final que tiene el mapa. Una prueba de confiabilidad sobre este parámetro se llevó a cabo en 2005, cuando se obtuvieron alrededor y dentro del campus de Ciudad Universitaria, 135 puntos de control geodésico (Prado y Peralta, 2005). Todos estos puntos se utilizaron en el proceso para generar un mosaico ortorectificado de la zona en estudio, la cual abarcó un área de 7 km^2, con imágenes con tamaño de píxel de 20 cm y con un error de posición de 45 cm. Esta densidad de puntos permitió hacer comparaciones en diferentes zonas del ortomosaico demostrando la confiabilidad en la magnitud del error entregado por el programa. Los puntos en el ortomosaico fueron también comparados contra una imagen ortorectificada de INEGI, de tal manera que se tuvieron dos fuentes de información para cotejar los resultados (Peralta *et al.*, 2005).

Una de las aplicaciones principales de este tipo de sistemas de adquisición de imágenes, es la evaluación de recursos naturales. En estos casos es más importante diferenciar las especies vegetales y conocer su estado fisiológico, que saber su ubicación exacta, aunque cada proyecto es diferente y se deben determinar cuáles

son los parámetros más relevantes en cada uno de ellos. No obstante, los mapas generados con el método aquí presentado se catalogan en algunos casos como CLASE 1, según los estándares de la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2007), que establece, por ejemplo, que para un mapa a escala 1:4 000 el error en horizontal (X,Y) debe ser de 1 m.

Finalmente, en la Tabla 1 se presenta una comparación de costos entre diferentes tipos de imágenes, obviamente, no en todos los casos la foto digital de pequeño formato es la mejor opción. Es necesario evaluar cada proyecto en particular y tomar la decisión que más convenga. Por ejemplo, para las dependencias gubernamentales y educativas de México están disponibles las imágenes de SPOT de manera gratuita (ERMEXS, 2012), esta es una opción que hay que considerar si la resolución es la adecuada para el proyecto. Sin embargo, si no se pertenece a ninguna dependencia de gobierno o educativa, el precio de una escena completa de SPOT es de € 8,000 (ASTRIUM, 2012).

Conclusiones

Las imágenes aéreas digitales de pequeño formato representan una alternativa económica en comparación con la fotografía aérea convencional y las imágenes de satélite. Hay que tomar en cuenta sus limitaciones y considerar que en la mayoría de los casos, la fotogrametría convencional proporciona un error significativamente menor que aquél que entrega la imagen de pequeño formato (Peralta *et al.,* 2005). Sin embargo, la gran flexibilidad que ésta tiene permite manejar de manera adecuada la resolución espacial y temporal para cumplir con los requisitos del proyecto, dando como resultado un mosaico ortorectificado que proporciona la calidad pictórica de la imagen y la precisión de un mapa. Se ha demostrado a lo largo de varios proyectos la factibilidad y pertinencia de llevar a cabo levantamientos aéreos y la consecuente formación de mosaicos ortorectificados de amplias zonas de territorio (*i.e.* del orden de 3 600 km^2). Otra gran ventaja de las cámaras de pequeño formato es su oportunidad, ya que permiten obtener imágenes de manera expedita.

Tabla 1. Comparación de costos entre diferentes tipos de imágenes

IMAGEN	Moneda	Costo	Costo MX$ enero 2012	Área km^2	Costo km^2 (MX$)	Resolución (m)	Bandas	Área mínima de compra (km^2)
Licencia anual SPOT Estación ERMEXS (no estéreo)	€	$1.75 M	$30.012 M					
Imagen SPOT libre de nubes, dependencias de la Administración Pública Federal e instituciones educativas.	€	$58.50	$1 003.28	3600	$0.28	Pan: 2.5 Multi: 10	Pan, R+G+B+IRc, SWIR	
Escena SPOT libre de nubes color (precio al público)	€	$8 100	$138 915	3600	$38.59	Pan: 2.5 Multi: 10	Síntesis Pan 2.5m + bandas de color R+G+B+IRc 5m	3 600 o 1 600 o 900 o 400, el costo aumenta si se reduce el área.
1/8 de escena SPOT libre de nubes color (precio público)	€	$3 060	$52 479	400	$131.2	Pan: 2.5 Multi:10	Pan 2.5m + color +IRc 5m	400
Deimos-1 (España)	€	$2 500	$42 875	Variable	$4.29	22	R+G+B+IRc	10 000
GeoEye1 (EUA)	US$	$7 875	$103 713	225	$460.9	Pan: 0.41 Multi:1.6	Pan, R+G+B+IRc	100
WorldView-2 (DigitalGlobe, EUA)	US$	$6 256	$82 391	224	$367.8	Pan: 0.46 Multi:1.8	Pan, R+G+B+IRc	224
QuickBird (EUA), Archivo, 5 escenas	US$	$49 798	$655 839	3557	$184.3	Pan: 0.61 Multi:2.4	Pan, R+G+B+IRc	

Tabla 1. Continuación

IMAGEN	Moneda	Costo	Costo MX$ enero 2012	Área km^2	Costo km^2 (MX$)	Resolución (m)	Bandas	Área mínima de compra (km^2)
Ikonos (EUA)	US$	$25.00	$329	1	$329.2	Pan: 0.82 Multi: 3.2	Pan, R+G+B+IRc	100
Escena FORMOSAT-2 (Taiwan)	€	$2 625	$45 018	576	$78.16	Pan:2 Multi: 8	Pan, R+G+B+IRc	576
Fotografía Aérea Digital de pequeño formato	MX$	$86 700	$86 700	400	$216.7	0.2	R+G+B+IRc	10
Ortomosaico de Fotografía Aérea Digital de pequeño formato.	MX$	$120 000	$120 000	400	$300	0.2	R+G+B+IRc	10
Ortofotografía Aérea Analógica (archivo, 2006)	MX$	$173 250	$173 250	864	$200	2	Pancromático	
Ortofotografía Aérea Analógica	MX$	$118 720	$118 720	366	$324.3	0.4	R+G+B	

Capítulo 2. Evaluación práctica y teórica de los modelos de regresión logística múltiple y cartográfica-hidrológica para la predicción de deslizamientos de tierra

Gabriel Legorreta Paulín
Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Marcus Bursik
Department of Geology, University at Buffalo

Fernando Aceves Quesada
Luis Mario Paredes Mejía,
José Lugo Hubp
Irasema Alcántara Ayala
José López García
Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Existe una gran variedad de métodos para evaluar la susceptibilidad de deslizamientos pero, en general, estos métodos pueden clasificarse en cuatro principales enfoques: de inventario, heurístico, estadístico y determinístico (Clerici *et al*., 2002; Dai *et al*., 2002; Metternicht *et al*., 2005; Zhou *et al*., 2003). Todos ellos, con sus propias ventajas y limitaciones se han implementado como aplicaciones en los sistemas de información geográfica (SIG), con la finalidad de evaluar los deslizamientos de tierra a escala local, y regional (Angeli *et al*., 2000; Atkinson y Massari, 1998; Bozzano *et al*., 2002; Castellanos y van Westen, 2008; Dehn y Buma, 1999; Demoulin y Chung, 2007; Di Gregorio *et al*., 1999; González *et al*., 1999; Guzzetti *et al*., 1999; Guzzetti *et al*., 2002; Jäger y Wieczorek, 1994; Lang *et al*., 1999; Lee *et al*., 2004; Metternicht *et al*., 2005; Miles y Ho, 1999;

Parise, 2001; Pasuto y Soldati, 1999; Qin *et al*., 2002a, b; Tobutt, 1982; Zhou *et al*., 2003).

Sin embargo, se ha detectado una importante limitación en las aplicaciones de los SIG en cuestiones de evaluación de estabilidad. Ésta se encuentra asociada con la inexistente comparación sistemática de los métodos utilizados, tanto en condiciones naturales como bajo escenarios teóricos para describir las ventajas y limitaciones de los métodos para modelar la distribución espacial de dichos movimientos. La falta de una comparación sistemática de los modelos de deslizamiento a diferentes escalas cartográficas, resoluciones de los modelos digitales de elevación (MDE), estrategias de muestreo y tipo de deslizamientos a estudiar, no solo compromete la confiabilidad de los modelos sino que conduce al abuso de los mismos. Esto es especialmente cierto para la validación de modelos en condiciones naturales en la que los problemas de resolución de píxel, interpolación, definición del tipo de deslizamiento, así como la incomprensión de los requisitos del modelo, el cálculo incorrecto y/o estimación de los parámetros topográficos, hidrológicos y del suelo, comprometen la eficiencia del modelo y ocultan el hecho de que un modelo puede ser una burda especificación de la realidad

A fin de evaluar las anteriores deficiencias en las aplicaciones de los SIG en la modelación de deslizamientos de tierra, en este estudio se aplica LOGISNET (desarrollado mediante el uso de macros (AML) del programa de SIG ArcInfo workstation) como una herramienta para comparar y contrastar las ventajas y limitaciones de la regresión logística múltiple (RLM), y de un enfoque cartográfico-hidrológico (SINMAP). Por razones de organización, se utiliza la siguiente nomenclatura: $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ para la versión mejorada de SINMAP dentro de LOGISNET y $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ para la versión incorporada de RLM en LOGISNET. Estos dos enfoques son seleccionados por las siguientes razones.

RLM no tiene significado físico, pero su enfoque estadístico está diseñado para predecir la probabilidad de deslizamientos. RLM supera los problemas de relaciones no lineales mediante una transformación logarítmica. Además, la función logística asemeja el comportamiento de los deslizamientos (DeMaris, 1992; Field, 2005; Menard, 2002; Ohlmacher y Davis, 2003).

SINMAP utiliza una aproximación determinística cartográfica e hidrológica, que combina la teoría de un modelo hidrológico (Beven y Kirkby, 1979; O'Loughlin, 1986) y de un modelo de estabilidad de pendiente-infinita del factor de seguridad (Hammond *et al*., 1992) para predecir zonas potenciales de deslizamientos mediante el uso de un índice de estabilidad (IE). El enfoque toma plenamente en cuenta el control topográfico a través del flujo de agua subterránea poco profunda en la generación de deslizamientos (Montgomery y Dietrich, 1994;

Pack *et al*., 1997, 2001); además combina variables topográficas, hidrográficas y suelo para predecir deslizamientos potenciales en zonas con escasa información.

En condiciones naturales, $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ (restringido a trece variables geotécnicas para su comparación con $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$) tienen moderado a bajo grado de concordancia con el mapa del inventario de deslizamientos. Cuatro posibles razones del moderado resultado de los modelos pueden explicar lo anterior: la exactitud del mapa del inventario de deslizamientos de tierra, la resolución del MDE, el tipo de deslizamiento de tierra a estudiar y los parámetros geotécnicos. Sin embargo, todos los anteriores problemas potenciales no pueden explicar el moderado rendimiento de los modelos en condiciones naturales. Bajo condiciones naturales, $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ es aparentemente un modelo más exitoso y flexible que $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ porque con menor número de variables los resultados de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ son similares o mejores a los de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$. Basado en los anteriores resultados, se implementa una evaluación teórica de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$. La evaluación teórica se enfoca en el efecto de la resolución del píxel en la representación y detección de deslizamiento por parte de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$. Para ello se utilizan deslizamientos de tierra artificial creados mediante la modificación manual de líneas altimétricas y con tamaños y parámetros geotécnicos publicados. La evaluación se realiza a 1, 5, 10 y 30 m, respectivamente, de resolución. A medida que aumenta el tamaño del píxel, el deslizamiento de tierra pierde la representación cartográfica. El resultado es un modelo de predicción sesgado. En las pruebas, las predicciones de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ son mejores que las de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$, si el modelo de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ tiene suficiente píxeles para obtener estadísticas fiables. $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ es más consistente al producir mapas de susceptibilidad similares sobre una serie de resoluciones. En general, $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ tiende a sobrepredecir, mientras que $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ tiende a subpredecir conforme aumenta el tamaño del píxel.

Antecedentes

En el pasado se han hecho esfuerzos para crear, probar y validar los modelos de susceptibilidad a deslizamientos de tierras (Borga *et al*., 2002a, b; Chinnayakanahalli *et al*., 2003; Dietrich *et al*., 2001; Lan *et al*., 2004; Montgomery y Dietrich, 1994; Morrisey *et al*., 2001; Pack *et al*., 1997, 1998, 2001; Wawer y Nowocień, 2003; Winsemius *et al*., 2005; Zaitchik *et al*., 2003). Sin embargo, la evaluación de un modelo es difícil de realizar debido a la complejidad de pro-

blemas concomitantes naturales y técnicos (Zaitchik *et al*., 2003). La evaluación es especialmente difícil en los modelos diseñados para la detección o predicción de deslizamientos superficiales o someros. Esto es debido a que las dimensiones espaciales de los deslizamientos superficiales son pequeñas en comparación con otros tipos de deslizamientos de tierras (Can *et al*., 2005). En condiciones naturales, sus pequeñas dimensiones espaciales comprometen su representación cartográfica ya que los deslizamientos superficiales pueden no tener expresión o simplemente son enmascarados al mezclarse con otros tipos de deslizamientos mayores a escala regional.

En 1998, Pack y colaboradores implementaron un Índice de Mapeo de Estabilidad (SINMAP) en un SIG. SINMAP fue apoyado por la *Forest Renewal* de la British Columbia en colaboración con la *Forest Products Ltd*. de Canadá, Vancouver, British Columbia, para proporcionar una herramienta para cartografíar la estabilidad del terreno (Pack *et al*., 1998, 2001). La aplicación de SINMAP va desde planificación y gestión forestal (Pack *et al*., 1998; Wawer y Nowocień de 2003;) hasta el establecimiento de la susceptibilidad de deslizamientos (Lan *et al*., 2004; Pack *et al*., 1998; Wawer y Nowocień, 2003; Witt, 2004). SINMAP utiliza un enfoque cartográfico/hidrológico para expresar la estabilidad de la pendiente del terreno en términos de un índice de estabilidad (Pack *et al*., 1998). Este índice expresa la estabilidad del terreno mediante el uso de seis clases (Tabla 1) y es calculado mediante la combinación del factor de seguridad del modelo de estabilidad con pendiente infinita (Hammond *et al*., 1992) y la teoría de un modelo hidrológico (Beven y Kirkby, 1979; O´Loughlin, 1986).

El segundo modelo, el modelo de RLM, fue diseñado para estimar la probabilidad de deslizamientos entre 0 y 1. En éste, la contribución de varias variables se transforma en probabilidad por una función logística. Esta función tiene una

Tabla 1. SINMAP, definición de clases de estabilidad

Clase	Condición IE: Valores del índice de estabilidad	Clasificación (predicción de estabilidad)
1	IE > 1.5	Zona estable
2	1.5 > IE > 1.25	Zona moderadamente estable
3	1.25 > IE > 1.0	Zona casi-estable
4	1.0 > IE > 0.5	Zona de umbral más bajo de estabilidad
5	0.5 > IE > 0.0	Zona de umbral más alto de estabilidad
6	IE < 0	Zona de pendiente defendida o inestable

forma sigmoidal que puede ser interpretada como de riesgo mínimo de un área a sufrir deslizamientos cuando la función tiene valores bajos y ésta se mantiene como de bajo riesgo hasta que cierto umbral es alcanzado, entonces la probabilidad de deslizamientos aumenta rápidamente conforme los valores de la función se incrementan (Kleinbaunm y Klein, 2002). Este modelo tiene la ventaja sobre otras técnicas estadísticas multivariables en el hecho de que la variable dependiente solo puede tener dos valores –un evento ocurre o no ocurre (Ohlmacher y Davis, 2003). En este sentido, un deslizamiento de tierra es categorizado como 1 o 0, o como una zona con deslizamientos o sin deslizamientos de tierra. La problemática de la falta de una relación lineal entre variables es superada por la RLM mediante el uso de la transformación logarítmica.

En el caso de SINMAP, su evaluación en condiciones naturales es escasa y ha llevado a la afirmación de que SINMAP define bastante bien las zonas que intuitivamente parecen ser susceptibles a deslizamientos (Deb y ElKadi, 2009; Meisina y Scarabelli, 2007; Morrisey *et al.*, 2001). En estos trabajos se insiste en que SINMAP tiene que ser alimentado con parámetros geotécnicos calibrados y con MDE precisos para tener éxito en la predicción (Pack *et al.*, 1998; Wawer y Nowocień, 2003). Por ejemplo, Witt (2004) encuentra una subestimación de los deslizamientos de tierras cuando se usan datos no calibrados. El uso de parámetros calibrados mejora la asignación de clases pero, incluso con datos calibrados, existen ciertos problemas, entre los cuales cabe destacar el exceso de predicción de áreas de deslizamientos y la falta de cambio en la predicción de áreas de deslizamientos con el aumento de la recarga de agua (Morrisey *et al.*, 2001; Witt, 2004). Por otra parte, también Legorreta y Bursik, (2006) demuestran que SINMAP pierde información cerca de las fronteras e incluso dentro del MDE.

En el caso de RLM, su evaluación en condiciones naturales ha llevado a la afirmación de que RLM es bastante exitoso en la identificación de laderas donde se han observado deslizamientos superficiales. Este éxito es posible si se utiliza una estrategia de muestreo adecuada, y se seleccionan las variables que estén más estrechamente relacionadas con los deslizamientos de tierra de un área (Ayelew y Yamagishi, 2005; Bai *et al.*, 2010; Can *et al.*, 2005; Ohlmacher y Davis, 2003; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2010; Yesilnacar y Topal, 2005;).

En la mayoría de los trabajos que utilizan RLM o SINMAP se emplean datos geotécnicos extraídos del la zona de cabecera o depleción del deslizamiento y no del depósito o de la zona de evacuación, pues estos últimos son afectados y modificados por otros deslizamientos que también aportan material. La zona de depleción es considerada la zona de inicialización y de aporte del material, mientras

que el área entre la zona de depleción y el depósito final es generalmente referido como la zona de evacuación en un deslizamiento (Archarya *et al*., 2011).

Materiales y métodos

SINMAP y RLM son analizados y comparados en condiciones naturales y teóricas, artificiales. En condiciones naturales, los modelos son evaluados en un corredor de la autopista 101 a lo largo de la costa entre Wilson Creek y la ciudad de Crescent City, en el condado del Norte, California, Estados Unidos. El área de Mill Creek se encuentra en la parte norte de este corredor y se utiliza como zona piloto para obtener los parámetros geotécnicos y validar los modelos. A pesar de contar con un MDE de 10 m de resolución de la zona en estudio, se utiliza un MDE a 30 m a fin de realizar una prueba de reconocimiento para determinar deslizamientos en grandes regiones. Esta evaluación explora las dificultades de evaluar un modelo a escala regional con complejas variables cartográficas, ambientales y condiciones geológicas.

La evaluación teórica se basa en condiciones artificiales generadas a partir de MDE cuya superficie es suavizada y alterada para crear condiciones estables e inestables en sus laderas. La evaluación teórica evalúa los efectos de la resolución del píxel que afecta el número de píxeles sobre la representación cartográfica de deslizamientos superficiales (< 2 m de profundidad) y deslizamientos de asentamiento-profundo (> de 2 m de profundidad) y éste a su vez en las predicciones hechas por $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$.

Aunque $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ está diseñado para detectar solo deslizamientos superficiales, un deslizamiento de asentamiento-profundo se utilizará para evaluar si $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ es capaz de detectar este tipo de deslizamientos. Los MDE se crean utilizando los métodos estándares de la digitalización topográfica, interpolación y agregación, así como utilizando filtros para suavizar la superficie de los MDE. Los deslizamientos artificiales son generados en MDE cuyas resoluciones son de 1, 5, 10 y 30 m, respectivamente. Los deslizamientos de tierra artificiales son creados mediante la modificación manual de las curvas de nivel para producir efectos de deslizamientos. Sus dimensiones espaciales están basadas en tamaños de deslizamientos publicados (Dietrich *et al*., 2001; Dietrich y Montgomery, 1998; Montgomery y Dietrich, 1994; Pack *et al*., 1997, 1998, 2001; Van Den al Eeckhaut *et al*., 2005). En este estudio, la zona de deslizamiento de tierra artificial es identificada como el área de depleción. El área de evacuación y el depósito no están incluidos en la zona de deslizamiento de tierra artificial. Dos criterios se

eligen para seleccionar el tamaño de píxel: *a)* Modelos Digitales de Elevación a 1, 5, 10 y 30 m de resolución horizontal, son típicos y ampliamente utilizados para modelar deslizamientos de tierra; y *b)* la delimitación mínima legible de una zona de deslizamiento de tierra. Debe haber al menos cuatro píxeles para representar el área de un deslizamiento (Hengl, 2006).

El método de comparación entre "el modelo de predicción *vs.* el mapa del inventario de deslizamientos" se utiliza para evaluar la modelación. El porcentaje de superposición entre el mapa de susceptibilidad creado por los modelos y el mapa del inventario de deslizamientos es la medida del grado de certeza con el cual el modelo predice la realidad. Un esquema de categorización integrado por dos clases (zona con deslizamientos y zonas sin deslizamientos) se utiliza para facilitar la comparación. Para $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$, las seis clases de IE se reclasifican de la siguiente manera: *a)* el área con deslizamientos de tierra incluye la zona de pendiente defendida o inestable, la zona de umbral más alto de estabilidad y la zona de umbral más bajo de estabilidad; *b)* el área sin deslizamiento incluye la zona estable, la zona modernamente estable y la zona casi-estable. Ambas clases se basan en el criterio del modelo de estabilidad de pendiente-infinita del factor de seguridad en la que los valores de IE mayores a uno son estables y los menores a uno son inestables. Para $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$, el régimen de clasificación de dos utiliza la probabilidad de 0.5 como el punto de ruptura (Dai *et al.*, 2002). Los valores superiores a 0.5 se clasifican como áreas con deslizamientos de tierra y los menores que 0.5 se clasifican como áreas sin deslizamientos de tierra. Los mapas de inventarios de deslizamientos fueron elaborados mediante el proceso de rasterización y con la misma resolución de los MDE usados.

El MDE teórico inicial se construyó a partir de un mapa topográfico, escala 1:10 000, con curvas de nivel a intervalos de 5 m. El mapa cubre el área afectada por la erupción del volcán Paricutín (1943-1952) en la parte central del campo volcánico de Michoacán-Guanajuato en México. El mapa fue publicado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1946. El mapa analógico se digitalizó con AutoCAD para su posterior incorporación en un SIG. De este mapa se seleccionó la subárea de las laderas del volcán Capatzin al norte del volcán Paricutín. La Figura 1 muestra el área en estudio para obtener un MDE teórico a 1, 5, 10 y 30 m, respectivamente, de resolución. Las curvas de nivel altimétricas a intervalos de 5 m, se transformaron posteriormente a un formato raster utilizando el programa ILWIS SIG. Se utilizó una interpolación lineal para obtener el valor altimétrico de cada píxel (Gorte y Koolhoven, 1990). La interpolación inicial se llevó a cabo a 1 m de resolución para producir un MDE temporal de 800 columnas x 700 renglones. El MDE temporal de 1 m de resolución se rotó a 90° hacia el este con el fin de

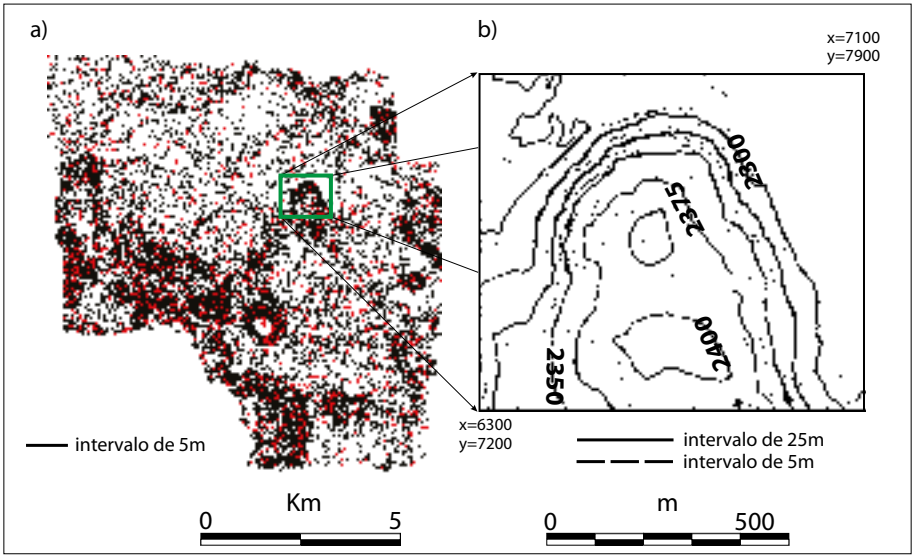


Figura 1. Área utilizada para generar los MDE teóricos a 1, 5, 10 y 30 m de resolución. a) Líneas altimétricas a intervalos de 5 m. El volcán Capatzin (resaltado con un cuadrado) se utiliza como área de estudio teórica. b) Un acercamientos a las curvas de nivel del volcán Capatzin.

facilitar la representación de áreas de deslizamientos que fueron creadas posteriormente en la zona oriental del volcán. Posteriormente, el MDE temporal fue suavizado con un filtro de paso bajo usando ArcInfo. El filtro de paso bajo fue aplicado iterativamente 500 veces en el MDE de 1 m de resolución utilizando una ventana de 3x3 con un valor de 1.9 para el núcleo central. El proceso de suavización se efectuó no solo para disminuir la rugosidad de la interpolación, sino también para llenar cualquier área de deslizamiento de tierra pre-existente. El resultante MDE de 1 m de resolución utilizado en esta prueba se muestra en la Figura 2. Se utilizó una modificación manual posterior de las curvas de nivel para crear el deslizamiento artificial superficial y el de asentamiento-profundo. Sobre esta modificación manual se realizó una interpolación lineal a fin de obtener nuevos valores altimétricos. Estos nuevos valores altimétricos, de los deslizamientos artificiales superficial y del asentamiento-profundo re-emplazaron los valores altimétricos del MDE de 1 m. La sustitución se llevó a cabo utilizando álgebra Boleana en ArcInfo. A partir del MDE suavizado de 1 m de resolución y conteniendo los deslizamientos artificiales, se generaron MDE de 5, 10 y 30 m por el método de agrega-

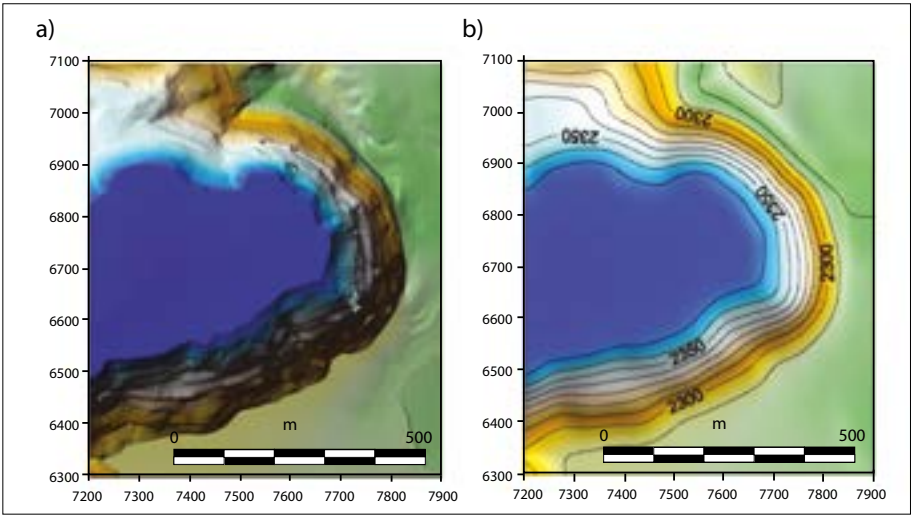


Figura 2. Vista planimétrica del MDE temporal y definitivo con resolución de 1 m. a) Representación de la rotación temporal del MDE a 1 m de resolución usado para generar los MDE teóricos a 1, 5, 10 y 30 m, respectivamente. b) MDE suavizadas por el filtro de paso bajo. El suavizado del MDE proporciona la base para analizar el comportamiento de los modelo en laderas sin deslizamientos.

ción. Para propósitos de identificación, los nombres de los MDE se dan en función a su resolución horizontal: MDE1m, MDE5m, MDE10m y MDE30m (Figura 3).

El deslizamiento superficial es de 20 m de largo y 10 m de ancho y tiene un escarpe de 1.6-3.5 m de profundidad. El deslizamiento de asentamiento-profundo es de 120 m de largo por 50 de ancho y tiene un escarpe de 6-15 m de profundidad. Se asume que todas las propiedades geotécnicas son las mismas a lo largo de las laderas del MDE. Para $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$, un punto único de muestreo se coloca en el escarpe del deslizamiento de asentamiento-profundo. Las propiedades geotécnicas del punto de muestreo (Tabla 2) se establecen con base en valores publicados para un suelo pardo volcánico limo-arenoso que tiene 1 m de espesor con baja a moderada permeabilidad (Simon *et al*., 2000; Simon y Collison, 2002; Wawer y Nowocień, 2003; Legorreta, 1999; Selby, 1993). Ningún punto de muestreo se coloca en el deslizamiento superficial ya que los valores geotécnicos ocurren en toda el área del mapa.

$\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ es implementado usando el método de RLM "backward" (retrospectivo). El método "backward" se refiere a examinar las variables dentro del

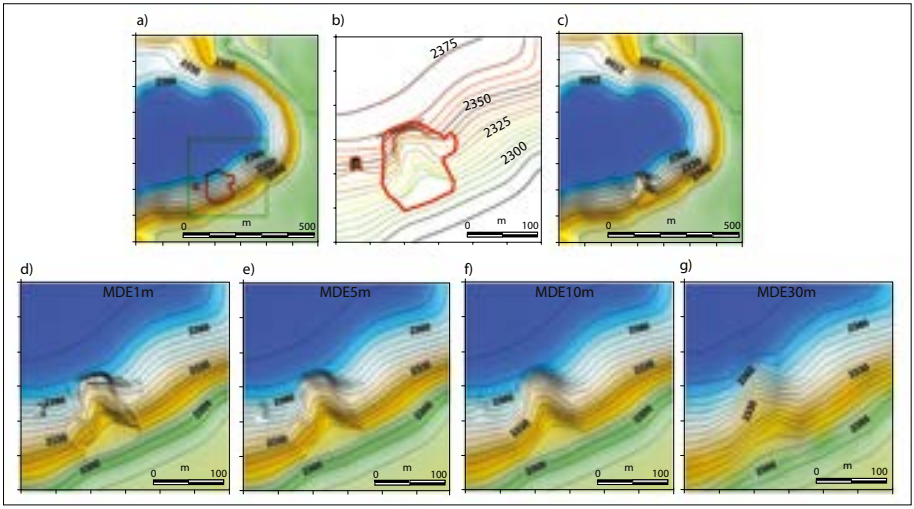


Figura 3. Pasos para construir los deslizamientos artificiales superficial y de asentamiento-profundo. a) El área es seleccionada para ser afectada por los deslizamientos artificiales en el MDE1m. b) Modificación manual de las curvas de nivel para producir el efecto de deslizamiento. c) Representación planimétrica de la ladera afectada por el deslizamiento artificial superficial y el de asentamiento-profundo. d) a g) Representación planimétrica del deslizamiento artificial superficial y el de asentamiento-profundo a 1, 5, 10 y 30 m de resolución.

modelo para ver si alguna(s) de ella(s) debe(n) de ser eliminada(s). La RLM con el método "backward" comienza el modelo con todas las variables independiente y las va probando para ver cuál de éstas puede ser removida del modelo sin tener un efecto sustancial sobre lo bien que el modelo se ajusta a los datos observados (Field, 2005). Se emplearon las mismas 13 variables independientes que $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ utiliza, a fin de compararlo con $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$, éstas son: el MDE con corrección de depresiones falsas (MDECDF), la dirección del flujo, la pendiente, el área de contribución del flujo, la saturación, la densidad del suelo, el espesor del suelo, el valor mínimo y máximo de transmisividad/lluvia total, la cohesión mínima y máxima y el ángulo de fricción interna mínimo y máximo. Además, la probabilidad de deslizamiento fue calculada mediante el uso de una muestra aleatoria de igual número de píxeles para las zonas con y sin deslizamientos. Los porcentajes del muestreo aleatorios para $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ fueron basados en la disponibilidad de píxeles en las diferentes resoluciones (Tabla 3).

Con la muestra aleatoria a diferentes resoluciones, el análisis de multicolinealidad y de regresión logística múltiple (RLM) se llevó a cabo. El diagnóstico

Tabla 2. Parámetros geotécnicos del punto de muestreo

Punto de Muestreo	1
MDE	1 m, 5 m, 10 m y 30 m
Capa del suelo (m)	1
Gravedad (m/s^2)	9.81
Densidad del agua (kg/m^3)	1 000
Densidad del suelo (kg/m^3)	1 850
T/R Min (m)	1 259
T/R Max (m)	2 500
Cohesión Min (sin unidades*)	0.14
Cohesión Max (sin unidades*)	0.25
Phi Min (°)	30
Phi Max (°)	32
Espesor del suelo (cm)	100
Ponderación del usuario	1

* LOGISNET$_{SINMAP}$ requieren un factor de cohesión sin dimensión como entrada, que se obtiene dividiendo la cohesión (Pa) por la gravedad (m/s^2), la densidad del suelo (kg/m^3) y espesor del suelo (m).

Tabla 3. Proporción de píxeles con deslizamiento y sin deslizamiento bajo diferentes tamaños de píxeles

MDE	MDE1m	MDE5m	MDE10m	MDE30m
# píxeles con deslizamiento	10 764	428	109	13
# píxeles sin deslizamiento	79 236	3 172	791	87
# total de píxeles	90 000	3 600	900	100
% de esquema de muestreo	2	10	40	80
# de muestreo de píxeles para áreas con deslizamiento	215	43	44	10
# de muestreo de píxeles para áreas sin deslizamiento	215	43	44	10
# total de píxeles muestreado	431	86	87	21
% píxeles muestreados en el MDE	0.48	2.38	9.69	20.80

de multicolinealidad se calcula utilizando el factor de inflación de varianza (VIF), (Pallant, 2005). Con la evaluación de los resultados del modelo de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ la probabilidad de deslizamientos se asignó píxel por píxel con base en la función logística (Legorreta y Bursik, 2008).

Modelado en condiciones naturales

El área en estudio en condiciones naturales reales se encuentra cerca de la autopista 101 en el condado del Norte en California, Estados Unidos (Figura 4). En la zona, deslizamientos de tierra a lo largo de la costa entre Wilson Creek y Crescent City crean una situación potencialmente peligrosa para personas y propiedades. Más de 200 deslizamientos de tierra han sido cartografiados por el Servicio Geológico de California y el Departamento de Transportes de California. El área en estudio es propensa a deslizamientos de tierra debido a la combinación de varios factores, tales como la alta precipitación (2 583.94 mm/año), trastornos al uso del suelo causados por la tala intensiva y la construcción de carreteras para la extracción de las maderas, la debilidad y alto grado de meteorización de las rocas, así como por sus laderas de fuerte pendiente (Madej *et al*., 1986; Wills, 2000).

Los tipos de rocas en el área pertenecen principalmente al Complejo Franciscano, el cual representa un complejo de acreción formado por subducción de la placa oceánica (la placa Farallón) con el margen occidental de la placa continental de América del Norte. Éste abarca un intervalo de tiempo entre el Jurásico tardío hasta principios de Cretácico (Madej *et al*., 1986; Wills, 2000).

En el área en estudio las siguientes limitaciones fueron identificadas: *a)* $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ está diseñado para predecir deslizamientos superficiales y en

Figura 4. Área en estudio en la autopista 101 en el norte de la provincia fisiográfica Coast and Range de California, Estados Unidos.

ella, el mapa del inventario de deslizamientos del Servicio Geológico de California muestra que hay un predominio de deslizamientos de asentamiento-profundo, lo cual enmascara junto con la abundante vegetación muchos de los pequeños deslizamientos superficiales (Wills, 2000) y *b)* si bien el mapa del inventario de deslizamientos tiene una base de datos, ésta no cuenta con la información geotécnica necesaria para alimentar los modelos. Para disminuir tales limitaciones se realizó trabajo de campo a fin de colectar información geotécnica; durante éste se verificó el 35% de los deslizamientos superficiales. El mapa del inventario de deslizamientos superficiales del área en estudio fue establecido como resultado de la combinación del mapa del inventario de deslizamientos del Servicio Geológico de California y el trabajo de campo realizado en abril y mayo del 2005.

Un total de 107 muestras fueron tomadas en áreas con y sin deslizamientos de tierra y llevadas al laboratorio para realizar las pruebas geotécnicas correspondientes y así poder obtener el ángulo de fricción interna y la cohesión de los materiales. En el laboratorio se obtuvo la infiltración y la transmisividad. Los datos de campo fueron complementados con tablas geotécnicas publicadas. Toda esta información fue integrada dentro del SIG. Las estrategias de muestreo para $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y para la $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ se diseñaron de diferente manera a fin de obtener un mejor rendimiento. Los sitios de muestreo para el análisis de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ fueron tomados en el escarpe de las zonas de deslizamiento y en zonas sin deslizamiento, en tanto que los sitios de muestreo para $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ fueron tomados únicamente de los escarpes.

$\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ fue calculado utilizando el método "backward" (Field, 2005). El análisis mostró que de las 13 variables estudiadas únicamente la pendiente, la saturación y la cohesión mínima contribuyen al modelo. Con la estimación del interceptor y de los coeficientes β's para la pendiente, la saturación y la cohesión mínima, la probabilidad de deslizamientos fue asignada píxel por píxel con base en la función logística. Varias pruebas se llevaron a cabo para evaluar si el interceptor y los coeficientes β del modelo de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ eran lo suficientemente robustos para hacer del modelo un modelo confiable (Tabla 4). Las estadísticas mostraron que $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ es confiable.

La prueba de Hosmer y Lemeshow y su grado de significación se utilizan para evaluar el nivel de ajuste del modelo elegido a los datos. Esta estadística pone a prueba la hipótesis de que los datos observados son significativamente diferentes de los valores predichos por el modelo (*Ibid.*). Para apoyar el modelo, el valor en esta prueba no debe ser significativo. La prueba de Hosmer y Lemeshow demostró que los resultados no fueron significativos, por lo que el modelo estimado de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ no difiere significativamente de los datos reales. A tra-

vés de un valor de 0.677 (Significancia de Hosmer y Lemeshow) se muestra que el modelo de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ se ajusta correctamente a los datos reales. En otras palabras, el modelo calculado por $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ puede predecir el mundo real bastante bien. Sin embargo, en este ejemplo, los dos valores de R^2 (0.266 y 0.372) sugieren que solo entre 26.6 y el 37.2% de la variabilidad en los deslizamientos dentro del modelo puede ser explicada por las variables de la pendiente, la saturación y la cohesión mínima (Prueba de R^2 de Cox & Snell y Nagelkerke). La confiabilidad del interceptor y de los coeficientes β es evaluada con la prueba de Wald (Tabla 4) y su grado de significación (WSig. en la Tabla 4). Esta prueba se utiliza para comprobar la hipótesis de cero interceptor (*Ibid.*). Las variables que tienen valores significativos menores que 0.05 son las que contribuyen significativamente a la capacidad predictiva del modelo (Pallant, 2005). Los valores del "WSig." (importancia de la prueba de Wald) de la pendiente, saturación y cohesión mínima son menores a 0.05, lo que significa que las variables contribuyen de manera significativa al modelo.

En la Tabla 4 también se muestran las razones de probabilidades (Exp (β)) y sus intervalos de confianza superior e inferior (95% IC Exp (β)). El Exp (β) representa el cambio en la probabilidad que resulta del cambio en una unidad en las variables independientes o predictoras. Cualquier interpretación que se haga de las razones de posibilidades quedará limitada a poder ser generalizada, si el intervalo de confianza de Exp (β) contiene el valor de 1 (Field, 2005). En este caso, ninguno de los valores del intervalo de confianza para cada una de las tres variables atraviesa el valor de 1, lo que indica que la dirección de esta relación es estable en la población en su conjunto.

La comparación de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ se muestra en la Figura 5. Con un píxel de 30 m de resolución, $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ parecen reflejar más las condiciones topográficas del terreno que la geomorfología de los deslizamientos. Al parecer, los modelos se limitan a detectar zonas escarpadas en lugar de detectar deslizamientos. Los resultados de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ (Figura 5b) muestran alta inestabilidad a lo largo de la costa, donde los deslizamientos de roca predominan, así como a lo largo de las gargantas donde predominan las fuertes pendientes. Sin embargo, el modelo no detecta muchos de los deslizamientos de tierra pre-existentes en la zona de terrenos montañosos, donde los deslizamientos superficiales se encuentran incluidos dentro de los de asentamiento-profundo. Los resultados de la $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ muestran una mejor correspondencia con el mapa del inventario de deslizamientos (Figura 5c). Sin embargo, la coincidencia no es perfecta, y una sobrepredicción es evidente. Para evaluar el rendimiento de los modelos, se realizó un análisis cuantitativo por

Tabla 4. Coeficientes, forma logística y conjunto de estadísticas usadas en $LOGISNET_{RLM}$

$LOGISNET_{RLM}$ (Método retrospectivo)									
Variable	Coeficiente	Error estándar	Prueba de Wald	Grados de libertad	WSig	Exp(β)	95% I.C. para EXP(β)		
							Inferior	Superior	
Interceptor	6.224	2.146	8.410	1	0.004	5.046E+02			
Pendiente	-0.154	0.032	22.914	1	0.000	0.857	0.805	0.913	
Saturación	-2.494	0.964	6.689	1	0.010	0.083	0.012	0.547	
Cohesión min.	0.079	0.026	9.428	1	0.002	1.082	1.029	1.138	
Forma logística	1 / {1 +Exp-[-2.525 + Pendientes (-0.154) + Saturación (-2.496) + Cohesión mínima (0.079)]}								
				Modelo			Prueba de Hosmer and Lemeshow		
% Total de clasificación	-2log likelihood	Cox & Snell R^2	Nagelkerke R^2	Chi^2	Grados de libertad	Significancia	Chi^2	Grados de libertad	Significancia
77.500	134.906	0.266	0.372	36.863	3	0.000	5.734	8	0.677

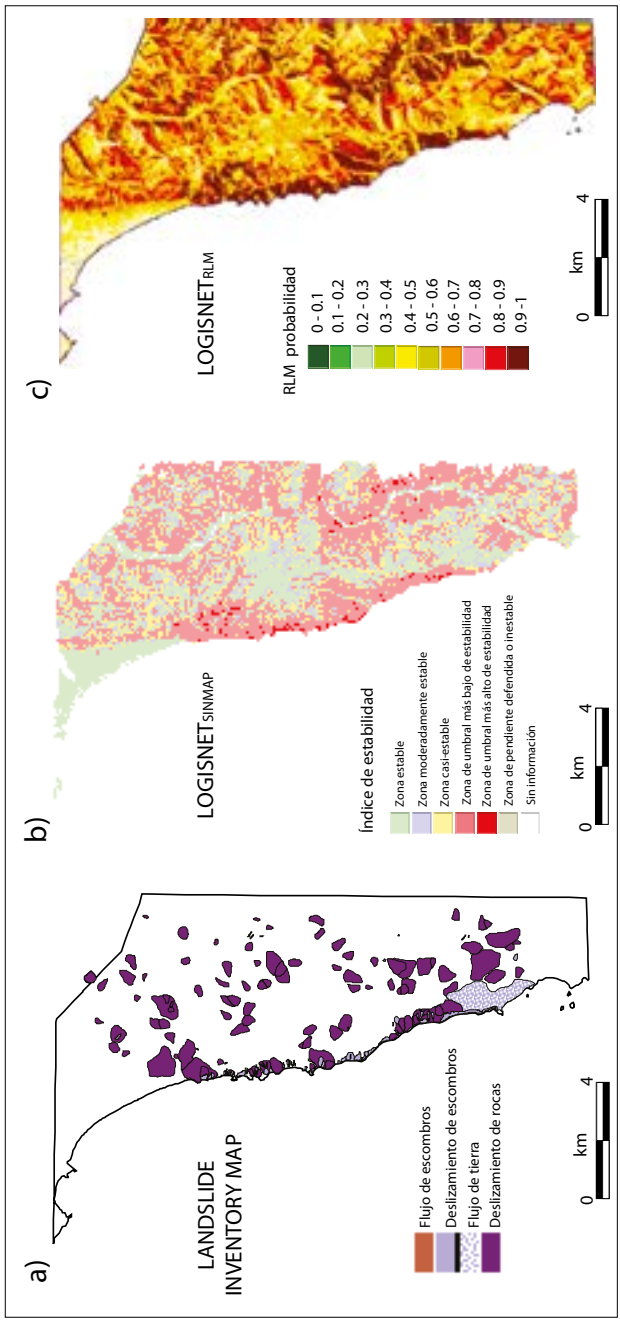


Figura 5. Mapa del inventario de deslizamientos y la predicción de los modelos LOGISNET$_{SINMAP}$ y LOGISNET$_{RLM}$.

medio de una tabla cruzada entre el resultante mapa de los modelos y el mapa del inventario de deslizamientos. La Tabla 5 muestra la precisión del productor (Produce's accuracy), ésta representa la razón entre el número de píxeles clasificados correctamente en cada categoría y el número total de píxeles verdaderos para esa categoría), la precisión del usuario (User´s accuracy), calculada como la razón entre el número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría y el número total de píxeles que están clasificados por el modelo en esa categoría, y la eficiencia del modelo (Model efficiency), calculado como la razón del número de píxeles indicados correctamente como píxeles de deslizamiento menos el número de píxeles indicados incorrectamente como píxeles de deslizamiento de tierra entre el número total de los píxeles que representan verdaderos deslizamientos en el mapa del inventario de deslizamientos. La eficiencia del modelo tiene un valor máximo de 1 cuando el modelo ha indicado todos los deslizamientos de tierra correctamente, y tiene un valor negativo cuando el número de deslizamientos de tierra incorrectamente indicados por el modelo es mayor que el número de deslizamientos de tierra correctamente predecido (Van Den Eeckhaut *et al.*, 2005; Tabla 5).

La precisión del productor muestra que la predicción de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ tiene mejor coincidencia (79.91%) con el mapa del inventario de deslizamientos en comparación con $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ (46.49%). Ambos modelos tienen un bajo porcentaje de píxeles de deslizamiento de tierra que efectivamente representan los deslizamientos en el mapa del inventario de deslizamientos (precisión de usuario). El coeficiente Kappa para $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ posee un valor de 0.6658, lo que indica que las clasificaciones son 66.58% mejores que las esperables al azar. Por su parte, $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ posee un valor de 0.3317, lo que indica que las clasificaciones son muy cercanas al azar. Los dos modelos predicen más píxeles de deslizamiento incorrecta que correctamente (eficiencia del modelo). $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$

Tabla 5. Precisión del productor, precisión del usuario y eficiencia del modelo

	$\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ (con datos de campo)	$\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ (Método "bakcward")
	Área de deslizamiento	Área de deslizamiento
Precisión del productor	46.49	79.91
Precisión del usuario	17.49	17.43
Eficiencia del modelo	-1.73	-2.99
Índice Kappa	0.3317	0.6658

tiende a sobrepredecir deslizamientos de tierra usando un píxel de 30 m. Esta sobrepredicción hace que $LOGISNET_{RLM}$ tenga una mejor coincidencia con el mapa del inventario de deslizamientos en zonas con deslizamientos de tierra en comparación con $LOGISNET_{SINMAP}$. Sin embargo, sus valores en las pruebas de precisión del usuario y eficiencia del modelo son bajos debido a su sobrepredicción. Ésta conduce a que más zonas sin deslizamientos sean clasificadas incorrectamente como zonas de deslizamiento en el modelo. Por el contrario, $LOGISNET_{SINMAP}$ tiende a subpredecir. $LOGISNET_{SINMAP}$, con datos calibrados, tiene una mayor precisión de usuario y eficiencia del modelo en el área en estudio. No obstante, $LOGISNET_{SINMAP}$ no identifica deslizamientos de tierra existentes. Para explicar el antagonismo estadístico, se sugiere que la precisión de usuario y la eficiencia del modelo favorecen a $LOGISNET_{SINMAP}$, porque las zonas de deslizamientos identificadas por el modelo son menores que las áreas sin deslizamiento en el mapa del inventario de deslizamientos. Esto no quiere decir que el modelo de $LOGISNET_{RLM}$ funciona inadecuadamente comparado con $LOGISNET_{SINMAP}$, ya que $LOGISNET_{RLM}$ fue calculado usando solo tres de las 13 variables originales que $LOGISNET_{SINMAP}$ usa. $LOGISNET_{RLM}$ obtuvo resultados tan razonables como $LOGISNET_{SINMAP}$ aun considerando un número mucho menor de variables.

Con base en estos resultados en condiciones reales o naturales, se observa que $LOGISNET_{RLM}$ tiene sobrepreedición de deslizamientos y que $LOGISNET_{SINMAP}$ subpredice deslizamientos. Algunos autores prefieren la sobrepreedición porque representa un potencial de futuras áreas de deslizamientos (Borga *et al*., 2002a; Chinnayakanahalli *et al*., 2003). Esto conlleva a plantearse si ¿la sobrepreedición o subpredicción de los modelos es constante a diferentes escalas? Para responder, es necesario realizar una validación teórica de los modelos bajo condiciones estrictamente controladas, a fin de comprender su comportamiento. La validación no es posible realizarla en condiciones naturales debido a que cualquier resultado obtenido está sujeto a problemas concomitantes naturales (tipo de deslizamiento, enmascaramiento por vegetación, etc.) y técnicos (escala del mapa, veracidad del inventario de deslizamientos, etc.). Estos problemas hacen que en condiciones naturales, nunca sea posible demostrar la "validez" de un modelo ambiental (Oreskes, 1998 citado por Zaitchik *et al*., 2003).

Modelado en condiciones teóricas

Para el modelado a diferentes resoluciones se deben considerar aquellos cambios que ocurren en la forma, el área y el volumen de los deslizamientos superficiales y

de asentamiento-profundo al pasar del formato vectorial al raster. Así por ejemplo, la forma lineal del límite del deslizamiento de tierra es remplazada por una forma pixelada durante el proceso de rasterización. La Figura 6 presenta el número de píxeles utilizados para representar a un deslizamiento superficial con una superficie de 278.8 m^2 y un deslizamiento de asentamiento-profundo con una superficie de 10 477.8 m^2. En el proceso de agregación de 1 de 5, 10 y 30 m, el número de píxeles utilizados para representar las áreas de los deslizamientos disminuye a medida que aumenta el tamaño de píxel. Para el deslizamiento superficial, el número de píxeles disminuye de 280 píxeles con una resolución de píxel de 1 m a cero con 30 m de resolución. Para el deslizamiento de asentamiento-profundo, el número de píxeles disminuye de 10 484 píxeles con una resolución de 1 m a 13 píxeles con 30 m de resolución (Figura 6).

Desde el punto de vista cartográfico, el número de píxeles debe ser por lo menos 2x2 para poder representar los objetos redondos pequeños, y al menos de dos píxeles para representar el ancho de objetos alargados (Hengl, 2006). Con el MDE30m, el deslizamiento superficial no tiene una representación espacial en el mapa. Aunque el deslizamiento superficial tiene tres píxeles en el MDE10m, esto no es suficiente para tener una buena representación cartográfica. Por lo tanto, deslizamientos superficiales pequeños (del tamaño empleado en esta prueba) no pueden ser detectados por $LOGISNET_{SINMAP}$ y por $LOGISNET_{RLM}$ con MDE10m y MDE30m.

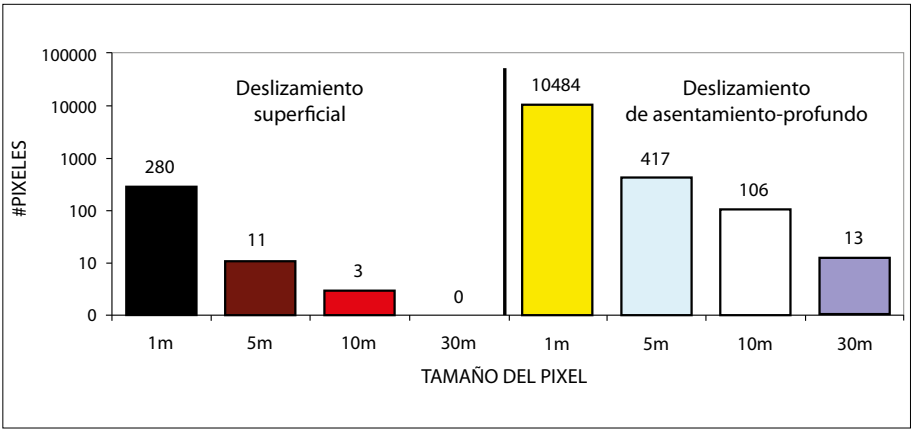


Figura 6. Efecto de la agregación de píxeles en el número de píxeles para representar los deslizamientos superficiales y de asentamiento-profundo.

Desde el punto de vista cartográfico, el deslizamiento de asentamiento-profundo está representado por un número suficiente de píxeles (13) usando la resolución del MDE30m. Sin embargo, $LOGISNET_{RLM}$ podría fallar en distinguir zonas de deslizamiento y zonas no afectadas por deslizamientos debido al pequeño número de píxeles disponibles. Estadísticamente, $LOGISNET_{RLM}$ necesita al menos 15 muestras por variable geotécnicos para realizar un análisis apropiado.

Los mapas resultantes de $LOGISNET_{SINMAP}$ y $LOGISNET_{RLM}$, a 1, 5, 10 y 30 m fueron comparados con el mapa del inventario de deslizamientos a la misma resolución (Figura 7). Los mapas de predicción de $LOGISNET_{SINMAP}$ con el MDE5m y el MDE10m se asemejan a la predicción espacial de deslizamientos calculados con el MDE1m. Sin embargo, a 30 m de resolución hay un cambio en la predicción espacial del patrón de deslizamiento: el deslizamiento superficial no se muestra porque los píxeles son muy burdos en el MDE. Por consiguiente, el modelo tiene la tendencia a sesgar su predicción hacia la clase de zonas sin deslizamientos. En una resolución de 1 m, la detección de los deslizamientos existentes superficiales y de asentamiento-profundo por parte de $LOGISNET_{RLM}$ es casi dos veces mejor que la hecha por $LOGISNET_{SINMAP}$. No obstante, para $LOGISNET_{RLM}$ a medida que aumenta el tamaño del píxel, la capacidad de predicción disminuye incluso con un alto porcentaje de muestreo. Por ejemplo, con una resolución de 1 m, $LOGISNET_{RLM}$ requiere de un muestreo de alrededor del 2% para obtener resultados satisfactorios, pero con una resolución de 5 m, $LOGISNET_{RLM}$ requiere de un muestreo del 10% para obtener el resultado, el cual es un mapa con sobrepredicción de áreas susceptibles a deslizamientos. A los 10 m de resolución, $LOGISNET_{RLM}$ requiere de un muestreo del 40%, y a 30 m de resolución del 80%, para obtener sus resultados, que son pobres y no válidos estadísticamente (Tablas 6, 7, 8 y 9). En la búsqueda de estadísticas válidas con píxeles de 10 y 30 m de resolución, $LOGISNET_{RLM}$ se vuelve inútil, ya que la mayoría de los deslizamientos existentes fueron identificados y utilizados para realizar la muestra estadística.

La validez para los modelos de $LOGISNET_{RLM}$ es mostrada en las Tablas 6 a 9, éstas expresan los resultados del análisis de multicolinealidad y de regresión logística múltiple realizado a diferentes resoluciones. Por ejemplo, para una resolución 1 m y con muestreo aleatorio del 2%, el análisis de multicolinealidad calculado como el factor de inflación de varianza (VIF), (Pallant, 2005) muestra que la altimetría, la pendiente, el área de contribución y la saturación pueden ser utilizadas en el análisis de $LOGISNET_{RLM}$ (Tabla 6). Estas cuatro variables están estrechamente relacionadas con la probabilidad de la distribución para la variable dependiente (áreas con deslizamientos o sin deslizamientos), pero no fuertemente relacionadas entre sí. La Tabla 6 también muestra la regresión logística múltiple

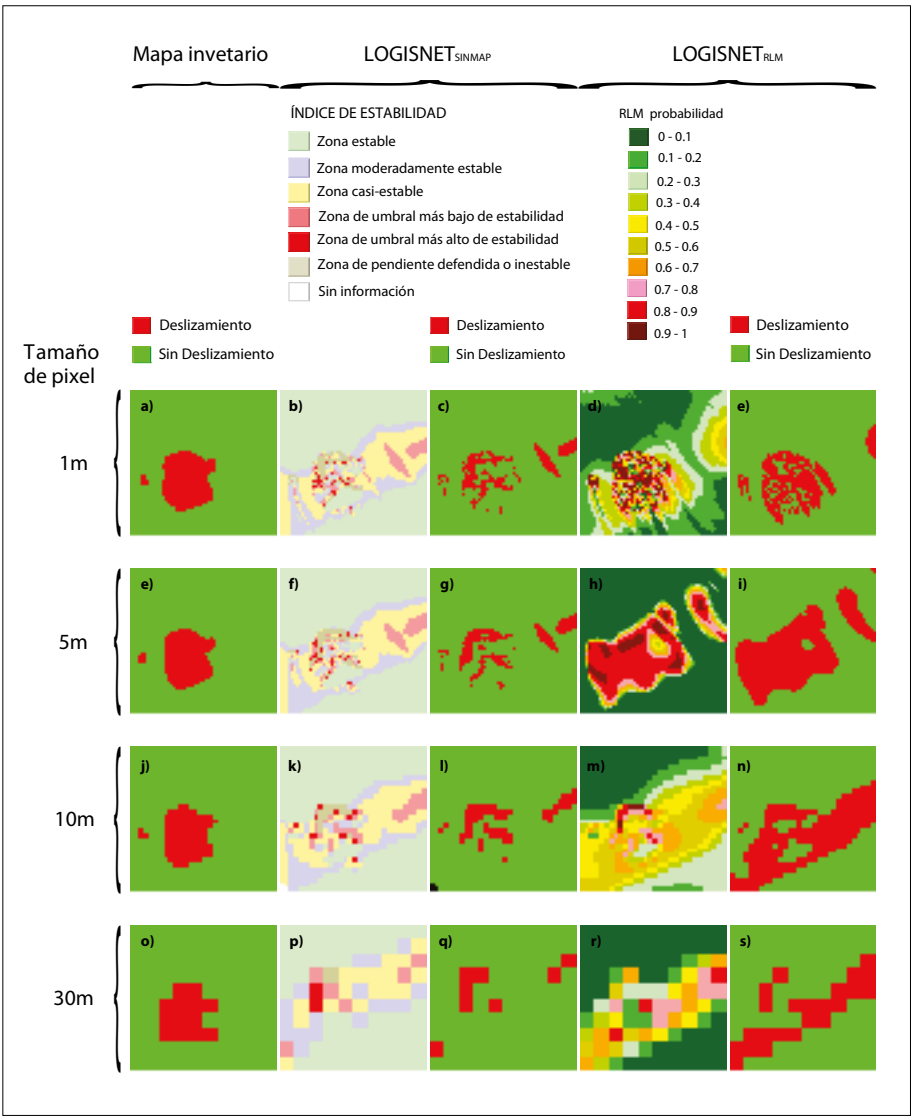


Figura 7. a), e), j), y o) Mapa del inventario de deslizamientos con una resolución de 1 m, 5, 10 y 30 m. b), f), k), y p) LOGISNET$_{SINMAP}$ con una resolución de 1, 5, 10 y 30 m y con sus seis clases de IE. c), g), l), y q) LOGISNET$_{SINMAP}$ con una resolución de 1, 5, 10 y 30 m y con un esquema de clasificación de dos clases. d), h), m) y r) modelos LOGISNET$_{RLM}$ con una resolución de 1, 5, 10, 30 m y con diez clases de probabilidad. e), i), n) y s) modelos LOGISNET$_{RLM}$ a 1, 5, 10 y 30 m y con un esquema de clasificación de dos clases.

Tabla 6. Coeficientes, forma logística, y conjunto de estadísticas usadas en $LOGISNET_{RLM}$ con el MDE1m y con un esquema de muestreo aleatorio del 2%

RLM (1m) con 2% de muestreo aleatorio									
Variable	Coeficiente	Error estándar	Prueba de Wald	Grados de libertad	WSig	Exp(β)	95% I.C. para EXP(β)		Estadísticas de colinealidad
							Inferior	Superior	
Interceptor	36.085	11.813	9.331	1	0.002	4.692E+15			VIF
MDECDF	-0.015	0.005	8.582	1	0.003	0.985	0.976	0.995	1.024
Pendiente	4.449	0.608	53.601	1	0.000	85.506	25.989	281.326	1.178
Área de contribución de flujo	-1.931	0.228	71.798	1	0.000	0.145	0.093	0.227	1.097
Saturación	2.102	0.797	6.952	1	0.008	8.185	1.715	39.061	1.081
Forma logística	1 /{ 1 +Exp-[36.085 + MDECDF (-0.015) + Pendientes (4.449) + Área de contribución de flujo (-1.193) + Saturación (2.102)]}								
				Modelo			Prueba de Hosmer and Lemeshow		
% Total de clasificación	-2log likelihood	Cox & Snell R^2	Nagelkerke R^2	Chi^2	Grados de libertad	Significancia	Chi^2	Grados de libertad	HLSig.
80.094	373.961	0.400	0.533	217.985	4	0.000	9.111	8	0.333

Tabla 7. Coeficientes, forma logística, y conjunto de estadísticas usadas en $LOGISNET_{RLM}$ con el MDE5m y con un esquema de muestreo aleatorio del 10%

RLM (5m) con 10% de muestreo aleatorio									
Variable	Coeficiente	Error estándar	Prueba de Wald	Grados de libertad	WSig	Exp(β)	95% I.C. para EXP(β)		Estadísticas de colinealidad
							Inferior	Superior	
Interceptor	-58.890	18.249	10.413	1	0.001	2.656E-26			VIF
Pendiente	-44.735	14.639	9.339	1	0.002	0.000	0.000	0.000	4.089
Área de contribución de flujo	50.512	15.297	10.903	1	0.001	8.653E+21	8.243E+08	9.083E+34	2.370
Saturación	-107.751	32.133	11.245	1	0.001	0.000	0.000	0.000	3.490
Forma logística	1 / {1 +Exp-[-58.890 + Pendientes (-44.735) + Área de contribución de flujo (50.512) + Saturación (-107.751)]}								
				Modelo			Hosmer and Lemeshow Test		
% Total de clasificación	-2log likelihood	Cox & Snell R^2	Nagelkerke R^2	Chi^2	Grados de libertad	Significancia	Chi^2	Grados de libertad	HLSig.
87.654	50.591	0.533	0.711	61.687	3	0.000	13.115	8	0.108

Tabla 8. Coeficientes, forma logística, y conjunto de estadísticas usadas en $LOGISNET_{RLM}$ con el MDE10m y con un esquema de muestreo aleatorio del 40%

RLM (10m) con 40% de muestreo aleatorio									
Variable	Coeficiente	Error estándar	Prueba de Wald	Grados de libertad	WSig	Exp(β)	95% I.C. para EXP(β)		Estadísticas de colinealidad
							Inferior	Superior	
Interceptor	41.987	26.486	2.513	1	0.113	1.717E+18			VIF
MDECDF	-0.019	0.011	2.721	1	0.099	0.981	0.959	1.004	1.201
Pendiente	4.895	1.378	12.613	1	0.000	133.630	8.967	1991.309	1.996
Forma logística	1 /{ 1 +Exp-[41.987 + MDECDF (-0.019) + Pendientes (4.895)]}								
				Modelo			Hosmer and Lemeshow Test		
% Total de clasificación	-2log likelihood	Cox & Snell R^2	Nagelkerke R^2	Chi^2	Grados de libertad	Significancia	Chi^2	Grados de libertad	HLSig.
62.821	87.649	0.226	0.302	20.020	2	0.000	4.565	8	0.803

Tabla 9. Coeficientes, forma logística, y conjunto de estadísticas usadas en LOGISNET$_{RLM}$ con el MDE30m y con un esquema de muestreo aleatorio del 80%

RLM (30m) con 80% de muestreo aleatorio									
Variable	Coeficiente	Error estándar	Prueba de Wald	Grados de libertad	WSig	Exp(β)	95% I.C. para EXP(β)		Estadísticas de colinealidad
							Inferior	Superior	
Interceptor	218.821	124.764	3.076	1	0.079	1.079E+95			VIF
MDECDF	-0.097	0.055	3.106	1	0.053	0.908	0.815	1.011	2.049
Pendiente	14.622	7.552	3.749	1	0.079	2239386.196	0.836	6.000E+12	3.163
Forma logística	1 /{ 1 +Exp-[218.821 + MDECDF (-0.097) + Pendientes (14.622)]}								
				Modelo			Hosmer and Lemeshow Test		
% Total de clasificación	-2log likelihood	Cox & Snell R^2	Nagelkerke R^2	Chi^2	Grados de libertad	Significancia	Chi^2	Grados de libertad	HLSig.
76.471	15.886	0.361	0.482	7.622	2	0.022	4.663	7	0.701

y las pruebas que se llevaron a cabo para validar al modelo. Se muestra el interceptor β y los coeficientes β. Los valores de los coeficientes β representan la contribución de las variables independientes a las variaciones en la variable dependiente. En el análisis de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$, el interceptor β y los coeficientes β se estiman por la Estimación de Máxima Verosimilitud (Kleinbaum y Klein, 2002). En el caso de la resolución de 1 m, los valores del "WSig." (importancia de la prueba de Wald en la Tabla 6) de la altimetría, la pendiente, el área de contribución y la saturación son menores a 0.05, lo que significa que las variables contribuyen significativamente al modelo.

En la Tabla 6 también se muestran las razones de probabilidades (Exp (β)) y sus intervalos de confianza superior e inferior (95% IC Exp (β)). En este caso, ninguno de los valores del intervalo de confianza para cada una de las cuatro variables atraviesa el valor de 1.

Los valores no significativos de la prueba de Hosmer y Lemeshow (HLSig. en la Tabla 6) para las cuatro variables muestran que $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ puede predecir el mundo real con certeza. Una correlación parcial entre las variables dependientes e independientes es calculada con la prueba de R^2 de Cox y Snell y Nagelkerke (Field, 2005). En este ejemplo, los dos valores de R^2 (0.400 y 0.533) indican que entre el 40 y el 53.3% de la variabilidad de deslizamientos puede ser explicada por las variables altimetría, pendiente, área de contribución y saturación.

La Tabla 10 muestra la evaluación de los dos modelos en términos de la precisión del productor y del usuario y de la eficiencia del modelo. A 1 m de resolución, la precisión del productor muestra que $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ tiene una mejor coincidencia (71.01%) entre su predicción y el mapa del inventario de deslizamientos en comparación con $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ (37.62%). Cada uno de los modelos tiene más de 50% de píxeles categorizados como de deslizamiento que en realidad representan deslizamientos en el mapa del inventario (precisión del usuario), y ambos modelos predicen más píxeles clasificados de manera correcta como deslizamientos que de forma incorrecta (eficiencia del modelo).

A los 5 y 10 m de resolución, la predicción de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ es constante, con la precisión del productor y del usuario similar a las de 1 m. A los 30 m de resolución, $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ decrece aún más su coincidencia con el mapa del inventario de deslizamientos.

A los 5, 10 y 30 m de resolución, la predicción de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ no es constante. $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ tiende a sobrepredecir deslizamientos. A 5 m de resolución, la sobrepredicción hace que el modelo de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ emule mejor al mapa del inventario de deslizamientos (93.69%) en comparación con $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ (34.81%). Sin embargo, este exceso de predicción hace que la precisión del usua-

Tabla 10. Precisión del productor, precisión del usuario y eficiencia del modelo

	$LOGISNET_{SINMAP}$ (1 m)	$LOGISNET_{SINMAP}$ (5 m)	$LOGISNET_{SINMAP}$ (10 m)	$LOGISNET_{SINMAP}$ (30 m)	$LOGISNET_{RLM}$ (1 m)	$LOGISNET_{RLM}$ (5 m)	$LOGISNET_{RLM}$ (10 m)	$LOGISNET_{RLM}$ (30 m)
	Deslizamiento	Deslizamiento	Deslizamiento	Deslizamiento	Deslizamiento	Deslizamiento	Deslizamiento	Deslizamiento
Precisión del productor	37.62	34.81	35.78	15.38	71.01	93.69	61.47	46.15
Precisión del usuario	58.88	52.65	54.93	25	57.75	35.96	24.81	26.09
Eficiencia del modelo	0.11	0.04	0.06	-0.31	0.19	-0.73	-1.25	-0.85
Índice Kappa	0.3246	0.2925	0.3028	0.0803	0.6601	0.9086	0.4495	0.3007

rio sea baja (35.96%) y la eficiencia del modelo sea negativa (-0.73). La sobrepredicción conduce a que más zonas sin deslizamientos sean clasificadas incorrectamente como zonas de deslizamiento en el modelo. Asimismo, como parte de la sobrepredicción, la forma de los deslizamientos se oculta y el escarpe principal no queda bien definido.

El bajo rendimiento de $LOGISNET_{RLM}$ a 10 y a 30 m era de esperarse debido a que el pre-test (Tabla 8 y 9) sugiere que los modelos no son estadísticamente válidos para la predicción de deslizamientos. A pesar de que la precisión del productor es razonables los resultados de $LOGISNET_{RLM}$ son pobres y con valores de predicción extremos. El valor bajo de la precisión del usuario indica que 75.19% de los píxeles a 10 m de resolución y 73.91% a 30 m de resolución identificados en la predicción como de deslizamientos están incorrectamente incluidos en la categoría de deslizamientos de tierra. Esto se confirma por el valor negativo alto que tiene la eficiencia del modelo (Tabla 10).

Con base en los resultados teóricos se sugiere que, en general, $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ tiende a subpredecir las áreas con deslizamientos, mientras que $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ tiende a sobrepredecirlas. Para cada modelo se hicieron las siguientes observaciones: *a)* la predicción de deslizamientos de tierra de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ se ve menos afectada por la resolución de píxel; *b)* la predicción del modelo $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ es relativamente constante a 1, 5 y 10 m de resolución, pero la detección de deslizamientos existentes es baja; *c)* independientemente de los efectos del tamaño de píxel, los mapas de susceptibilidad y sus estadísticas a 1, 5, 10 y 30 m de resolución muestran que $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ es capaz de detectar no solo deslizamientos superficiales, sino también los de asentamiento-profundo; *d)* $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ tiene la capacidad de predecir deslizamientos de asentamiento-profundo, siempre y cuando el deslizamiento tenga suficiente representación cartográfica; *e)* con 1 m de resolución, $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ posee una mejor detección de deslizamientos que $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$, sin embargo, a 5 m de resolución, la forma del deslizamiento de tierra queda oculta y el escarpe del deslizamiento no puede definirse con precisión como resultado del exceso de sobrepredicción, a pesar de que el modelo es estadísticamente válido (Tabla 7); *f)* con 10 y 30 m de resolución, $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ no es estadísticamente válido; conforme el tamaño del píxel se incrementa, es difícil obtener muestras dentro del MDE para entrenar al modelo, ya que disminuye la disponibilidad de píxeles con los cuales el modelo separa los prototipos elegidos como representantes de zonas con deslizamiento y de zonas sin deslizamiento.

Conclusiones

En este trabajo se introdujo la aplicación de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ al modelado de deslizamientos bajo condiciones naturales a fin de esbozar las ventajas y limitaciones de dichos modelos. Ambos modelos poseen un moderado grado de concordancia con el mapa del inventario de deslizamientos. En el caso de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$, el modelo tiende a la subpredicción. La disponibilidad y empleo de datos geotécnicos calibrados sugería desde un principio la mejor funcionalidad de los modelos. Sin embargo, los resultados de esta prueba no ilustran adecuadamente esta conjetura y por el contrario, proporcionan elementos para cuestionar la idea de utilizar $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ en la generación de mapas de susceptibilidad, debido a que la complejidad del trabajo que se requiere para obtener los parámetros geotécnicos en campo es muy elevada en comparación con los resultados arrojados por el modelo. En el caso de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$, el modelo es

capaz de predecir deslizamientos existentes en el mapa del inventario de deslizamientos en una mayor proporción debido a que el modelo tiende a sobrepredecir, sin embargo, esta sobrepredicción hace que el modelo tenga una baja precisión de usuario y eficiencia del modelo.

El moderado rendimiento de los modelos en la identificación de áreas potenciales con deslizamientos puede ser justificado por la insuficiente resolución del MDE o por la falta de un mapa del inventario de deslizamientos completo. No obstante, aunque se contara con un MDE de alta resolución y con un mapa del inventario de deslizamientos exhaustivo, sería difícil evaluar a los modelos a una escala regional debido a la complejidad de otros problemas fisiográficos y geológicos de la zona; la complejidad natural en una región puede inducir a errores en la estimación de deslizamientos por parte de modelos. La moderada similitud entre la predicción de los modelos y el mapa del inventario de deslizamientos ilustra claramente que los modelos no son exactos en condiciones naturales. Ante esta situación se introdujo la aplicación de una evaluación teórica de los modelos, mediante la cual se pudo confirmar que $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ y $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ tienden a subpredecir y a sobrepredecir, respectivamente. También la evaluación mostró que conforme el tamaño del píxel se vuelve más grande, los deslizamientos superficiales (20 m x 10 m) y los deslizamientos de asentamiento-profundo (120 m x 50 m) pierden representación cartográfica. Con la disminución del número de píxeles, la detección de pequeños deslizamientos superficiales se hace más difícil, especialmente con 10 y 30 m de resolución. A los 30 m de resolución, un deslizamiento de tierra superficial de 20 m x 10 m o menor es anulado del MDE. En el caso del deslizamiento de asentamiento-profundo, la obliteración es menos problemática, ya que un deslizamiento de asentamiento-profundo es generalmente de proporciones mayores.

$\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ consistentemente subpredice deslizamientos a 1, 5 y 10 m de resolución. Con 30 m de resolución, la predicción de $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ es ineficiente. $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ sobrepredice. Con una resolución de 1 m, $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ es un modelo más exitoso y flexible comparado con $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$ porque $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ obtiene resultados similares o mejores usando pocas variables. Sin embargo, los resultados de $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ se ven muy afectados por el tamaño de píxel; con MDE de píxel grande es difícil obtener estadísticas para separar las zonas de deslizamiento de las zonas sin deslizamiento, e incluso con un alto porcentaje de muestreo, el modelo no es válido. Sin embargo, $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$ tiene la posibilidad de incluir otras variables a fin de mejorar su rendimiento en comparación con $\text{LOGISNET}_{\text{SINMAP}}$. Además, con una resolución más fina, $\text{LOGISNET}_{\text{RLM}}$,

podría funcionar bien a escala regional bajo condiciones de alta densidad de deslizamientos, ya que, a escala regional, la toma de muestras para entrenar al modelo podría ser lo suficientemente extensiva para poder generar estadísticas válidas que proporcionen a los modelos elementos suficientes que les permitan identificar de manera adecuada las zonas con y sin deslizamientos.

Capítulo 3. Aplicaciones oceanográficas de la imágenes satelitales NOAA-AVHRR y SeaStar (Orbwiew-2)-SeaWiFS en los mares mexicanos

Olivia Salmerón García
Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México

Firmas espectrales de la temperatura superficial del mar y de la concentración de clorofila *a*

La energía que recibe la Tierra proviene del Sol, y comprende todas las regiones del espectro electromagnético (EEM) desde los rayos cósmicos hasta las longitudes de onda larga. Esta energía realiza una trayectoria desde el espacio sideral y la propia atmósfera terrestre hasta llegar a la superficie terrestre; sin embargo, no todas las longitudes de onda logran llegar debido a su interacción con dichos medios. La interacción puede caracterizarse en términos de dispersión, absorción y transmisión. Del mismo modo que la energía interactúa a través de los mecanismos mencionados, también lo hace con los elementos de la superficie terrestre, incluyendo las nubes, de tal forma que cada elemento tiene una firma espectral que lo caracteriza; es decir, del total de energía que recibe, unas longitudes de onda las absorbe, otras las refleja o emite. A continuación se describen las firmas espectrales del agua y de la clorofila *a*.

En términos físicos, la temperatura del planeta se debe a la capacidad de absorción de la energía solar, por parte de los elementos que constituyen la superficie terrestre. De la energía absorbida, el agua de los océanos refleja una parte en el visible, principalmente en el azul (0.4 μm) y el verde (0.5 μm), y emite otra parte en el infrarrojo térmico alrededor de las 10 μm. Durante este proceso de interacción con la energía, el océano además de reflejar y emitir en las longitudes de onda señaladas, absorbe prácticamente el 100% de todas aquéllas ubicadas desde el infrarrojo cercano 0.8 μm, hasta el infrarrojo térmico 10 μm (Figura 1).

En la Figura 2 se marca con línea punteada la firma espectral del agua pura, mientras que con líneas sólidas se muestra cómo se incrementa la reflectancia

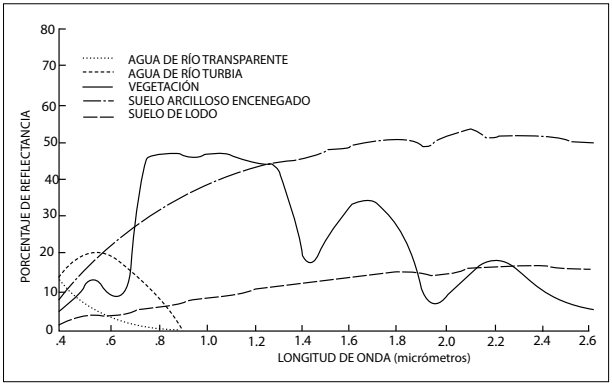


Figura 1. Firmas espectrales. (fuente: http://www.fao.org/docrep/003/t0446s/T0446S04.htm).

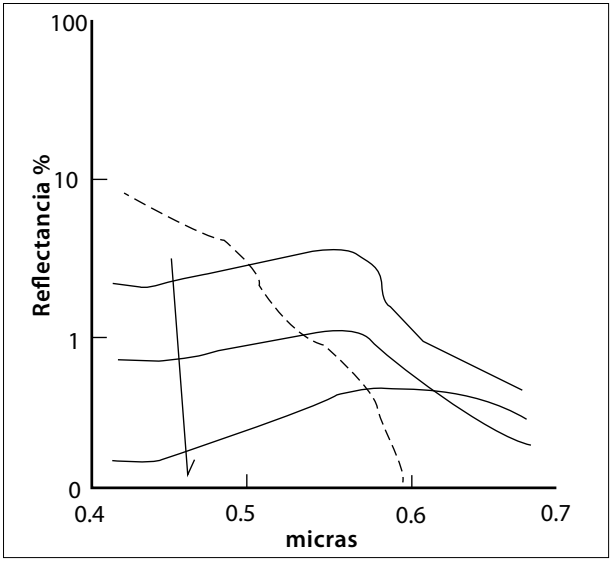


Figura 2. Firma espectral del agua (fuente: Robinson, 1985).

alrededor de las 0.6 μm, mientras que disminuye en las 0.4 μm, conforme se incrementa el contenido de sustancia amarilla.

Los sensores infrarrojos captan le energía que emite la superficie del océano, sin embargo, la temperatura que detectan (temperatura de brillo) no es realmente la del océano. En el caso de la superficie oceánica las temperaturas de brillo son más frías por varias razones, la presencia de nubes y de aerosoles, así como al hecho de que la superficie del océano es considerada como un cuerpo negro con una emisividad igual a uno, lo que implica que su reflectancia sea nula. Esto ocasiona errores que pueden ser hasta de 0.3 K. En realidad la emisividad del océano es

de 0.9926 y 0.9891 para los canales 4 y 5 de AVHRR (Universidad de Las Palmas, 2003). La consecuencia de los factores mencionados es una subestimación de la temperatura del mar que puede ser de varios grados centígrados dependiendo de las condiciones atmosféricas.

La distribución de la biomasa fitoplanctónica y la Chla además de otros parámetros relacionados con el campo de luz (penetración, dispersión y coeficiente de absorción) permiten hacer estimaciones de la producción primaria (Marlon *et al*., 1985). La clorofila *a* refleja la luz que recibe del Sol en la parte verde del espectro visible en longitudes de onda centradas en los 0.510 y 0.555 µm, mientras que presenta una fuerte absorción en la parte roja y azul centrada en las longitudes de 0.670 y 0.443 µm. En la Figura 3 se muestra el espectro de absorción de la Chla y Clorofila b. La Chla tiene dos picos de absorción, el primero en los 0.443 µm y el segundo en los 0.670 µm. La clorofila b absorbe en el azul a los 0.447 µm, así como en el anaranjado y en el rojo alrededor de los 0.660 µm Además de la Chla, el fitoplancton contiene varios pigmentos accesorios que absorben la energía solar en regiones del espectro electromagnético, diferentes a las que absorbe la clorofila *a,* éstos pueden ser la clorofila b y b-caroteno, también presentes en las algas verdes; la clorofila c y fucoxantina que se presentan en las diatomeas causando una coloración café al agua del mar; las biliproteínas en las cianofitas que dan un color azul-verde (Aguirre, 2002); por su parte los dinoflagelados pueden dar una

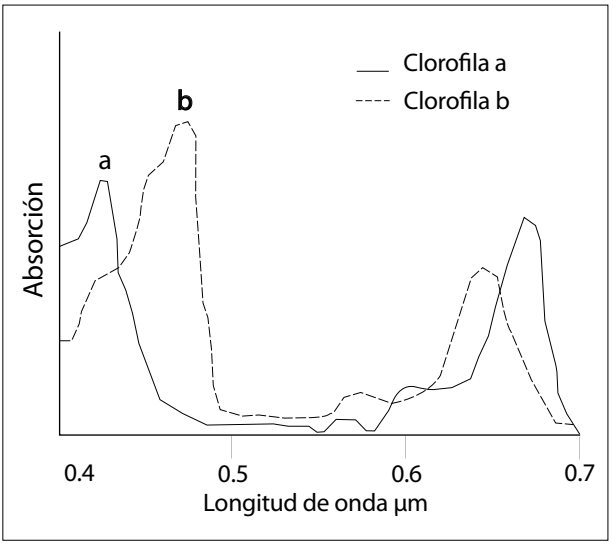


Figura 3. Espectro de la Chla y clorofila b. Modificado de Hernández Gil, 2002.

coloración roja debida a la peridinina; las xantofilas dan una coloración amarilla y los carotenoides ocasionan tonos amarillo-anaranjados (González, 2002).

Sensores AVHRR y SeaWiFS

a) Características de los datos AVHRR y SeaWiFS

Las imágenes satelitales de TSM son derivadas del sensor AVHRR (advanced very high resolution radiometer) a bordo de los satélites NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. Los satélites NOAA giran alrededor de la Tierra cada 104.9 minutos, a una distancia que varía entre los 833 y 850 km en una órbita cuasi polar. Ofrecen una visión sinóptica de los mares debido a su cobertura espacial y resolución temporal, prácticamente un paso del sensor AVHRR cubre todo el territorio mexicano dos veces por día, de tal manera que hacen posible la generación de mapas a través de los cuales se identifican estructuras tan dinámicas como las que se presentan en el océano. Estas estructuras tienen características que son importantes no solo para las pesquerías (Butler, 1990),[2] sino también para estudios de la dinámica oceánica como la localización de estructuras, su dirección y velocidad de desplazamiento, así como su relación con el cambio climático. Las características principales del sensor AVHRR se describen a continuación:

Resolución espectral. Se refiere a las cinco bandas o canales que conforman una imagen AVHRR y a su ubicación en el espectro electromagnético (EEM), es decir, cada banda o canal muestra la energía recibida por el sensor en un rango específico del EEM. La Tabla 1 describe cada uno de los canales AVHRR.

Resolución espacial. Se refiere al tamaño del píxel y se define como el tamaño del elemento más pequeño que puede distinguirse en una imagen. Está determinado por el ángulo de visión instantáneo y la altura de la plataforma. En el caso del sensor AVHRR el píxel es de 1 km en cobertura local al nadir y, 9 km en cobertura global. Fuera del nadir puede alcanzar los 5 km debido a la curvatura terrestre y a la posición del satélite (Kidwell, 1991).[3] Por su parte, el ángulo de vista instantáneo (IFOV, por sus siglas en inglés) está definido como el ángulo sobre el cual el detector es sensible a la radiación proveniente de fuentes externas. El

[2] http://www.fao.org/docrep/003/t0355s/t0355s00.htm

[3] http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0022_avhrr_l1b.gd.html#kidwell

ángulo bajo el cual el sensor AVHRR ve la superficie terrestre es igual a 1.3 mrad. Este dato multiplicado por la altura de su órbita indica el tamaño de los píxeles.

Resolución temporal. Es el tiempo que tarda el sensor en pasar por el mismo punto sobre la superficie terrestre, para el sensor AVHRR es de 12 hr, de tal forma que se tienen dos imágenes cada 24 horas, una de día y una de noche. Además tiene la característica de pasar a la misma hora local, por lo que también es un satélite heliosíncrono.

Resolución radiométrica. Es la capacidad de representar la energía captada por el sensor y almacenada en formato digital, lo cual significa que la señal recibida es dividida en rangos discretos a los cuales se les asigna un valor numérico en código binario. El sensor AVHRR tiene una resolución de diez bits (2^{10}), es decir, divide la señal en 1 024 niveles de intensidad, de ahí que sea un sensor de muy alta resolución radiométrica.

Para la medición de la temperatura superficial del mar el sensor AVHRR usa tres bandas espectrales: la banda 3 en el infrarrojo medio (3.5-3.9 μm), y las bandas 4 y 5 en el infrarrojo térmico (10.5-11.5 y 11.5-12.5 μm, respectivamente). Estas últimas bandas captan la energía emitida por la superficie oceánica en las longitudes de onda de máxima emisión de la superficie terrestre.

El Sensor SeaWiFS (Sea viewing Wide Field of view Sensor) fue puesto en órbita en 1997 a bordo del satélite SeaStar. Describe una órbita polar a 705 km de la superficie terrestre cada 99 minutos, aproximadamente, por lo que cubre toda la Tierra entre 14 y 15 vueltas. Fue diseñado específicamente para aplicaciones marinas, seis de sus bandas son capaces de captar el color del océano en la región del visible y dos más se utilizan para calibraciones atmosféricas en el infrarrojo cercano. Las bandas 2 y 6 (0.443 y 0.670 μm) están ubicadas en la parte de ab-

Tabla 1. Resolución espectral y aplicaciones del sensor AVHRR. 1 μm=10^{-6} metros

Banda	Resolución espectral	Aplicaciones
1	0.58-0.68 μm (verde-rojo)	Meteorología
2	0.72-1.05 μm (IR cercano)	Meteorología y vegetación
3	3.55-3.92 μm (IR medio)	Incendios, meteorología y TSM
4	10.3-11.3 μm (IR térmico)	TSM y Meteorología
5	11.5-12.5 μm (IR térmico)	TSM y Meteorología

sorción de la Clorofila *a,* la banda 3 (0.490 µm) representa la absorción de los pigmentos no clorofílicos (carotenoides), mientras que las bandas 4 y 5 (0.510 y 0.550 µm) corresponden a longitudes de onda en donde la Chla refleja más la energía luminosa, por tanto, es una herramienta de gran valor para el estudio del color de océano.

Resolución espectral. Cada imagen se compone de ocho bandas localizadas principalmente en las regiones del visible e Infrarrojo cercano (IRC) del espectro electromagnético (Tabla 2).

Resolución espacial. El píxel o celdas que conforman las imágenes SeaWiFS miden 1.1 km al nadir en cobertura local, y 9 km en cobertura global. En los extremos de la imagen el área que cubre el píxel es mayor de 1.1 km y puede llegar hasta 5 km. El ángulo de vista instantáneo (IFOV) es de 1.6 mrad.

Resolución temporal. 12 horas, aun cuando el paso de noche no es de utilidad para las mediciones del color del mar.

Resolución radiométrica. Diez bits al igual que las AVHRR.

Nivel de saturación. Una de las características de SeaWiFS como sensor del color del océano, es su capacidad para registrar señales de baja intensidad como las provenientes del agua de mar, en consecuencia, tiene un rango de saturación bajo, comparado con otros sensores dedicados a estudios terrestres.

Tabla 2. Resolución espectral, nivel de saturación y aplicaciones del sensor SeaWiFS

Bandas	Resolución espectral	Aplicaciones
1	0.402-422 µm (violeta-azul)	Absorción de sustancia amarilla
2	0.433-453 µm (azul)	Absorción de Clorofila *a*
3	0.480-0.500 µm (azul-verde)	Absorción de pigmentos no clorofílicos
4	0.500-0.520 µm (verde)	Concentración de Clorofila *a*
5	0.545-0.565 µm (verde-amarillo)	Correlación con fluorescencia
6	0.660-0.680 µm (anaranjado-rojo)	Absorción de Clorofila *a*
7	0.745-0.785 µm (rojo)	Corrección atmosférica
8	0.845-0.885 µm (IR cercano)	Corrección atmosférica

b) Algoritmos para el cálculo de Temperatura superficial del mar y concentración de clorofila a

La determinación de la TSM en el sistema TeraScan utiliza los algoritmos creados por McClain *et al*. (1985) para imágenes de día y el de Bernstein (1982) para los pasos nocturnos, en el que además de las bandas 4 y 5 se utiliza la banda 3. El algoritmo de McClain *et al.* aprovecha las diferencias del efecto atmosférico en la ventana infrarroja térmica, bandas 4 y 5, mientras que el algoritmo de Bernstein utiliza la diferencia entre las bandas 3 y 4 para distinguir superficies nubosas de aquéllas libres de nubes, esta diferencia está dada por las propiedades entre la emisividad de la superficie oceánica y de las nubes. Para la banda 4, la emisividad entre ambos objetos es muy cercana a la unidad. En la banda 3, la emisividad del mar también es cercana a la unidad, sin embargo, la emisividad de las nubes es menor, alrededor de 0.75. Como resultado, la diferencia de la banda 3 y banda 4 será negativa para superficies nubosas. En la superficie del océano, la diferencia de la banda 3 y banda 4 está relacionada con el total del vapor de agua atmosférico a través del cual la señal viaja hacia el sensor. En condiciones muy húmedas, la diferencia banda 3 y banda 4 es significativamente positiva, alrededor de 2; en condiciones de humedad moderada es ligeramente positiva, alrededor de 1. En condiciones de poca humedad la diferencia será ligeramente negativa, -0.5; y para condiciones atmosféricas muy secas, la diferencia puede alcanzar un valor de -1.0 (SeaSpace Corporation; Figura 4).

Algoritmos para el cálculo de la TSM

Ventana dividida, mc (McClain *et al*., 1985)
TSM = A*T4 + B*(T4-T5) + C*(T4-T5)*(SEC(sza)-1) + D*(SEC(sza)-1) + E

Doble ventana, bz (Bernstein, 1982)
TSM = A*T4 + B*(T3-T4) + C*(T3-T4)*(SEC(sza)-1) + D*(SEC(sza)-1) + E

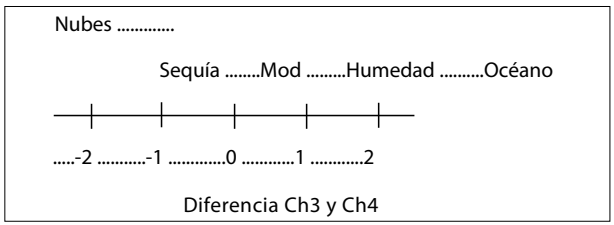


Figura 4. Diferencia banda 3 y banda 4.

E es una constante para transformar el resultado de grados Kelvin a grados centígrados en cuyo caso se especifica E(C).

T3, T4 y T5 son las temperaturas de brillo de los canales 3, 4 y 5.

A, B, C, y D son los coeficientes y que varían en función del satélite de que se trate, se pueden obtener de la página de NOAA.

(sza) se refiere al ángulo zenital solar, aquél que se forma entre la normal en el punto de observación y el vector de vista del satélite (del satélite al píxel), Figura 5.

El algoritmo utilizado para calcular la concentración de clorofila *a*, a partir de SeaWiFS, es el siguiente:

$$Chla = -0.040 + 10^{(0.341-3.001X+2.81 X 2 - 2.041 X 3)}$$

Donde x = cociente de las bandas azul (3) y verde (5), por ejemplo, L_w490 / L_w555

c) Temperatura superficial del mar y concentración de clorofila a

La temperatura superficial del mar (TSM) está estrechamente vinculada con áreas biológicamente productivas, hay especies como los salmónidos que están bien adaptados a las fluctuaciones estacionales, mientras que otras prefieren condiciones homotérmicas (FAO, 1992). Por otra parte, la TSM permite identificar varios fenómenos oceánicos. Por ejemplo, hay zonas en donde se presentan surgencias, las cuales son afloramientos de agua relativamente fría y rica en nutrientes (fósforo, nitrógeno y silicatos), (Libes, 1992), que estimulan el crecimiento del

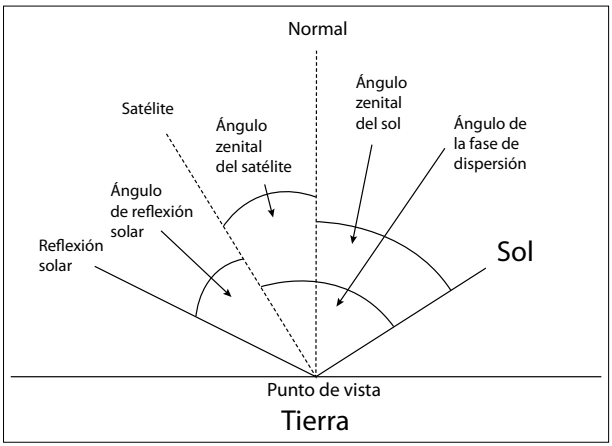


Figura 5. Ángulo zenital solar.

fitoplancton. Los altos niveles de variabilidad espacio-temporal de la TSM y los nutrientes juegan un papel importante en la determinación de las características biológicas de las regiones marinas. Las fluctuaciones de un año a otro en la reproducción de especies pesqueras comerciales pueden deberse a diferencias en la temperatura o en la abundancia de nutrientes (Cole y Villacastin, 2000); por ejemplo, en frentes térmicos cálidos es probable la presencia del atún, mientras que en las aguas frías es posible la localización del salmón (Herron *et al*., 1989).

La clorofila *a* (Chla), es un pigmento al igual que la clorofila b, el b-caroteno, la clorofila c, la fucoxantina, las xantofilas y los carotenoides contenidos en el fitoplancton. Este último son plantas marinas microscópicas que convierten la luz solar en alimento (carbohidratos y oxígeno), a través del proceso de fotosíntesis; ésta es un proceso complejo en el cual la energía luminosa es absorbida por la clorofila y convertida en energía química (ATP) y poder reductor (NADPH), al mismo tiempo que libera oxígeno; también es posible que la energía absorbida sea disipada como calor; o bien, que sea emitida en longitudes de onda mayores que implican la pérdida de energía (fluorescencia). Posterior a la captura de un fotón por un pigmento se produce una serie de reacciones que dan lugar a los enlaces C – C (carbono-carbono) de los carbohidratos y otras sustancias ricas en energía. La asimilación o fijación del dióxido de carbono es una reacción en la cual el CO_2 de la atmósfera se captura y se reduce por la adición de H+ para formar carbohidratos (ciclo de Calvin). Por último, la energía se libera mediante procesos respiratorios o metabólicos aportando O_2 a la atmósfera (Hernández Gil, 2002). Con el proceso de fotosíntesis se producen azúcares, aminoácidos y ácidos grasos que son el alimento para el fitoplancton. Ahora bien, dado que el fitoplancton es la base de la cadena alimenticia, su presencia es un factor determinante en la producción pesquera (Herrera, 1994). Así mismo, juega un papel importante en la ecología marina ya que cualquier cambio en su distribución y abundancia puede causar impactos significativos en el ecosistema entero. Durante la fotosíntesis el fitoplancton convierte el dióxido de carbono del agua de mar y de la atmósfera en carbono orgánico y libera oxígeno. Esto permite a los océanos absorber el dióxido de carbono excedente en la atmósfera (Hoepffner *et al*., 2008). Al disminuir el fitoplancton, el dióxido de carbono en la atmósfera se incrementa indicando que el fitoplancton juega una parte importante en la regulación de la cantidad del carbono en la atmósfera. De esta forma el fitoplancton no solo es importante desde el punto de vista alimenticio, sino también como regulador en el balance del dióxido de carbono en el planeta.[4]

[4] (http:seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS/LIVING_OCEAN/TEACHER4.html)

La concentración y distribución de clorofila *a* son entonces indicadores de la presencia de fitoplancton y del potencial en la producción primaria (Kratzer *et al*., 2000). Se trata de la producción de materia orgánica a partir de materia inorgánica por parte de los organismos autótrofos a través de la fotosíntesis y es el punto de partida de la cadena trófica. Cabe mencionar que la producción primaria se refiere a la cantidad de carbono fijado fotosintéticamente y disponible para el primer nivel heterotrófico, de tal forma que es una medida relevante en los procesos biológicos y el ciclo del carbono (Behrenfeld y Falkowski, 1997).

Aplicaciones en México

La TSM obtenida a partir de datos satelitales, así como la concentración de clorofila *a,* tienen importantes ventajas sobre los datos *in situ*. Su cobertura espacial, hablando de AVHRR y SeaWiFS, permite obtener información diaria a nivel nacional de la dinámica de los mares mexicanos. Esta característica juega un papel relevante debido a que los fenómenos que se presentan pueden tener cambios significativos entre el día y la noche; o bien, tener una duración de días o hasta semanas que difícilmente pueden observarse con datos *in situ*. Con éstos, es posible obtener datos en un momento y un punto específico sobre la superficie del mar; sin embargo, la siguiente observación dependerá de la revisita de la embarcación de investigación, la cual puede ser varios días o hasta años después. Por su parte, un acervo de datos satelitales, mínimo de diez años, permite detectar la variabilidad estacional, anual e interanual así como la influencia, en los mares mexicanos, de fenómenos globales como El Niño, y representarlos en mapas a nivel nacional (Aguirre *et al*., 2007b) o bien a nivel regional (Álvarez *et al*., 2001); así como determinar la magnitud de la variación en la TSM, por ejemplo en la costa suroeste de México, en donde El Niño Oscilación del Sur (ENSO) de 1997-1998 causó un incremento entre 3 y 5° C (Aguirre *et al*., 2003). También es posible relacionar las surgencias con eventos de marea roja (Aguirre *et al*., 1999), como el ocurrido en febrero de 1996 en las costas de Mazatlán, los cuales generan condiciones propicias para el desarrollo de los organismos causantes de la marea roja, *Mesodinium rubrum* y *Gymnodinium catenatum*. Cambios súbitos en la TSM pueden disminuir algunas especies de algas, pero no todas. Es posible que a principios de febrero, algas resistentes a dichos cambios de temperatura como *Gymnodinium catenatum,* permanezcan después de un episodio de enfriamiento. Otro documento sobre la detección de mareas rojas por la presencia abundante de dinoflagelados tóxicos, es el de Tomlison *et al.* (2004), donde a través de imágenes

de Chla del sensor SeaWiFs, de 1999 al 2000, detecta *Karenia brevis* al este del Golfo de México y reporta que los eventos de florecimiento de algas se observan desde agosto hasta marzo-abril, para cada uno de los años de estudio. En el mismo artículo, el autor describe siete regiones, de acuerdo con la frecuencia de florecimientos algales, a lo largo de la costa oeste de Florida.

En Aguirre *et al.* (2077) se realizó un análisis de la variación de Chla en el Pacífico Sur mexicano, que muestra las diferencias entre las estaciones de verano e invierno desde 1998 al 2003, así como el efecto de los vientos en la formación de la surgencia del Golfo de Tehuantepec y su impacto en la Chla. Resalta el invierno de 1998 con anomalías negativas de Chla (-0.15 mg/m^3), el cual se explica por El Niño de 1997-1998; por su parte, el verano e invierno del 2003 fue de condiciones normales y la Chla presentó anomalías positivas superiores a 0.15 mg/m^3. Por su parte, González Silvera *et al.* (2004), realizaron un estudio de la formación y características de los giros que se forman en los golfos de Tehuantepec y Papagayo, utilizando imágenes de temperatura superficial del mar (AVHRR) y de concentración de clorofila *a* (SeaWifs), en el periodo noviembre de 1998 y marzo de 1999. Un aspecto importante de los giros en Tehuantepec es que fertilizan las aguas mediante un incremento en la Chla con la consecuente abundancia de fitoplancton, lo cual favorece las condiciones tróficas elevando la productividad pesquera. Un estudio más sobre las estructuras de mesoescala en la superficie marina en México es el de Navarro *et al.* (2004), quien utilizó imágenes de TSM derivadas del sensor AVHRR, de octubre y noviembre del 1985, para identificar las características de giros, frentes, filamentos y albercas de agua caliente, observables en superficie, en el Golfo de California. De esta forma se llegó a la conclusión de que el área con la temperatura más baja, en la zona, alcanza una diferencia máxima de 6° C con respecto del agua al sur de dicha zona, y una diferencia alrededor de 0.05° C km^{-1} con respecto al gradiente horizontal.

Por otra parte, el Ordenamiento Marino es una tarea que empezaron algunos países, desde los años ochenta, mediante programas globales en los que inicialmente eran pocos los participantes, sin embargo, con el paso del tiempo se han incluido otros como México con la finalidad de colaborar en la conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos. De esta forma se han hecho algunas regionalizaciones a nivel mundial considerando como base la productividad primaria, el relieve submarino o parámetros físico-químicos del agua. En México se han propuesto algunas regionalizaciones a escala nacional y otros a escala regional, considerando distintos parámetros, por ejemplo los procesos físicos en el Golfo de México (Zavala *et al.*, 2006). En este trabajo se detectaron diez regiones a partir de la revisión de varias investigaciones en las cuales se estudiaron

parámetros como el transporte a través del canal de Yucatán, datos satelitales de altimetría, TSM y Chla, que han contribuido al conocimiento de la dinámica del Golfo de México. En otro estudio basado solamente en datos satelitales de Chla arrojó la presencia de catorce regiones, también en el Golfo de México, de las cuales se explica su localización y temporalidad a través de los procesos oceanográficos que ahí ocurren (Salmerón *et al*., 2010).

Más allá de conocer la dinámica de la TSM y la Chla, y de las estructuras y procesos oceánicos con los cuales se relacionan; es decir, las corrientes marinas, las surgencias, los frentes, los giros y las zonas de convergencia, en cuanto a su espacialidad y temporalidad, es necesario identificar el grado de influencia que pudieran tener; en actividades económicas como la producción pesquera, por ejemplo en Salmerón (2009) se hizo un análisis de los dos parámetros físicos mencionados, de 1996 al 2001 en el Golfo de México, y se concluye que la producción pesquera total en peso vivo aumenta a finales de verano y finales de otoño, cuando la temperatura comienza a descender y las concentraciones de Chla aumentan.

Conclusiones

La aplicación de datos de temperatura superficial del mar y de concentración de clorofila *a*, derivados de sensores remotos, en los mares mexicanos, han confirmado aspectos estudiados anteriormente, por ejemplo, el incremento en las temperaturas por efecto de El Niño; sin embargo, con base en las imágenes satelitales, se pudo cuantificar que el evento Niño 1997-1998 favoreció un aumento entre 3 y 5° C en el sureste mexicano. Del mismo modo, las variaciones en la temperatura del mar se pudieron relacionar con la presencia de especies de dinoflagelados tóxicos como *Mesodinium rubrum*, *Gymnodinium catenatum y Karenia brevis,* causantes de marea roja en las costas de Mazatlán y al este del Golfo de México, respectivamente.

Por su parte, con las imágenes de concentración de Chla, ha sido posible estimar que el Niño 1997-1998 generó anomalías de -0.15 mg/m^3 en el Pacífico Sur, mientras que en 2003, año normal, las anomalías fueron positivas, de 0.15mg/m^3. El estudio de la dinámica de estructuras de mesoescala a través de imágenes de temperatura y de Chla, en el Golfo de California, determinó la diferencia de temperaturas de la zona fría, entre las islas San Esteban y San Lorenzo y, la zona de agua cálida, en 6° C y un gradiente horizontal de 0.05° C/km.

Por último, el conocimiento de las variaciones espacio-temporales de los parámetros y dinámica oceánica, se ha vinculado con el aprovechamiento y manejo

de recursos pesqueros, para lo cual la regionalización de los mares mexicanos es la base que permite administrarlos de manera integral. Así, el establecimiento de catorce regiones con base en la variabilidad de la Chla, en el Golfo de México, es un ejemplo de este esfuerzo.

Capítulo 4. Utilización de imágenes aéreas digitales de alta resolución en la evaluación de recursos naturales

Jorge Prado Molina
Armando Peralta Higuera
Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México

José López García
Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Desde que hicieron su aparición, las imágenes aéreas digitales de alta resolución han sido utilizadas desde hace más o menos tres lustros en una gran diversidad de proyectos. Aunque las primeras cámaras contaban con un sensor de 1524 x 1012 elementos de imagen, es decir, 1.54 Mpíxeles (Kodak DCS 420), éstas se encontraban muy lejos de la resolución equivalente de la película de 35 mm (12 Mpíxeles) que es el tamaño de negativo con el que siempre se les ha comparado, no obstante, desde un principio se apreció el potencial de estos equipos como herramienta de teledetección (King, 1992). Los avances tecnológicos han permitido que hoy en día sea común tener resoluciones del orden de 24 Mpíxeles en cámaras de pequeño formato, con un costo del orden de 10 000 USD. Lo que significa tener, por ejemplo, una cobertura de 4.0 x 3.0 km volando a una altura de 19 000 pies y con un tamaño de píxel en el terreno de 0.6 m (Figura 1). Sin lugar a dudas, esto ha permitido aumentar las posibilidades de análisis al abordar los distintos proyectos que utilizan estas imágenes como insumo básico.

Si bien es cierto que en la actualidad se cuenta con imágenes satelitales de alta resolución (*i.e.* menos de un metro) su costo y disponibilidad son factores que las ponen en desventaja con respecto a la fotografía aérea digital. Por otra parte, esta última ofrece una gran flexibilidad en cuanto a cobertura del área en estudio, resolución, y lo más importante: permite la obtención de estereopares. Y más aún, las técnicas de generación de mosaicos ortorectificados a partir de estas imágenes,

están más que probadas en zonas extensas de territorio y han demostrado su utilidad en gran cantidad de proyectos (López, 2006; Ramírez, 2011; Prado *et al*., 2006).

La alta resolución permite no solo la clasificación de árboles individuales (Pouliot y King, 2005), sino también llevar a cabo diferentes estudios sobre los parámetros biofísicos de la vegetación (Wulder, 1998). Entre la variedad de imágenes disponibles en el mercado, con diferentes resoluciones espaciales utilizadas, las que tienen un tamaño de píxel de 1 m, han demostrado ser las más adecuadas para el reconocimiento y conteo de árboles individuales (Sugumaran *et al*., 2003); sin embargo, escalas más grandes proporcionan una identificación directa de la mayoría de los tipos de cubiertas vegetales y especies, siempre y cuando éstas no se encuentren mezcladas entre sí (Wulder *et al*., 2004), además, la alta resolución junto con la inclusión de mediciones de textura, pueden incrementar potencialmente la precisión en la clasificación (Laliberte y Rango, 2009).

Por otro lado, la formación de un mosaico ortorectificado de una zona en estudio, permite llevar a cabo el análisis multitemporal de los cambios en la cubierta vegetal, ya que puede ser utilizado como cartografía base a partir de la primera vez que es generado. El análisis de las fotografías (efectuado por un experto), determina el estado actual de la vegetación y establece un fundamento para futuras interpretaciones; las imágenes aéreas digitales de alta resolución constituyen un conjunto de datos muy valioso para este tipo de análisis.

Cámaras de formato pequeño

Las cámaras digitales se dividen en tres categorías: gran formato, medio y pequeño. Las primeras son producidas por tres vendedores principales, como son Leica™, Vexcel™ e Intergraph™, en contraparte, para las de formato pequeño existe una gran variedad de fabricantes y dentro de esta categoría, las que se recomienda usar para propósitos de adquisición de imágenes, son las de uso profesional, por la cantidad de píxeles, estabilidad mecánica, robustez y por la calidad del lente; es mejor evitar la distorsión introducida a las imágenes por los lentes de cámaras de bajo costo. Por otra parte, existen en el mercado algunas cámaras de formato medio que pueden ser una buena opción para llevar a cabo tareas de teledetección, sin embargo, esta discusión sale del alcance de este capítulo.

Es un hecho que las cámaras de formato pequeño no tienen la precisión geométrica de las de gran formato, ni mucho menos cuentan con marcas fiduciales o parámetros de calibración para la obtención de los elementos de orientación interna (distancia focal calibrada, desviación del punto principal y distorsión

Figura 1. Ejemplo de una imagen obtenida con una cámara Nikon D3x, que tiene una cobertura de 4x3 km, con tamaño de píxel de 0.6 m.

del lente), sin embargo, mediante diferentes procedimientos, es posible corregir geométricamente las imágenes para obtener ortoimágenes y a partir de ellas, ortomosaicos (Prado *et al*., 2006).

Es recomendable, al llevar a cabo un levantamiento aéreo, obtener por lo menos tres bandas en color (las típicas RGB) y una infrarroja (IR). Dependiendo del proyecto y la necesidad específica de interpretación que se requiera, se pueden usar diferentes filtros enfrente del lente para lograr una mejor discriminación de los elementos presentes en la zona en estudio (Everitt y Escobar, 1995; Peralta Fabi *et al*., 1991). En los ejemplos que se presentan en este capítulo, únicamente se han empleado cámaras a color y en IR, ajustándolas para que tengan aproximadamente la misma cobertura del terreno y mezclando las diferentes bandas para crear compuestos en falso color.

El cada vez mayor número de elementos fotosensibles en los sensores de imagen ha permitido obtener un menor tamaño de píxel sobre el terreno; comparativamente, cuando se vuela a la misma altura, sin embargo, el tamaño de aquél es ajustado en dependencia directa de las necesidades del proyecto y en algunos casos es determinado por la altura del terreno o las condiciones de tráfico aéreo. En la Tabla 1 se presenta de manera resumida un ejemplo del tipo de cámaras que se han usado en diferentes levantamientos. El tamaño de píxel ha variado de 2.0 a 0.25 m a lo largo de estos años.

Tabla 1. Cámaras de pequeño formato utilizadas en diferentes proyectos, y el número de píxeles del sensor de imagen

Cámara de pequeño formato	Año en que se utilizó	Núm. de Mpíxeles
Kodak DCS 420	1999	1.54
Nikon D1	2001	2.66
Nikon D1X	2003	6.00
Kodak DCS 14n Pro	2005	12.21
Nikon D2X	2006	12.40
Canon EOS 1DS Mark II	2009	16.61
Nikon D3x	2010-2011	24.5
Kodak DCS 420 monocromática (IR)	1999-2001	1.54
SONY DSC-F707 (IR)	2003-2005	4.91
Cannon EOS Revel (IR)	2006-2009	7.96

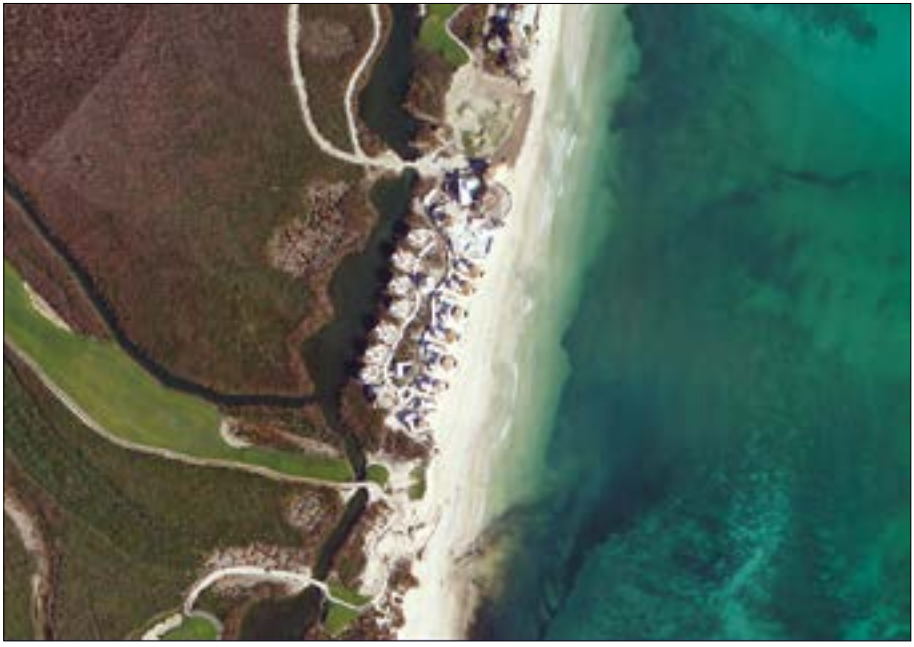
Ejemplos de aplicación

En esta sección se muestran diferentes usos que es posible dar a las imágenes aéreas digitales de alta resolución, obtenidas con cámaras de pequeño formato. La evaluación de recursos naturales es sin lugar a dudas un área en la que dichas imágenes han sido ampliamente utilizadas, no obstante, existen muchísimas otras aplicaciones en las que también se han empleado con gran éxito, como es el caso de los estudios de impacto ambiental, los cambios de uso de suelo, el muestreo de campos de cultivo para estimar el volumen de cosechas, la evaluación de desastres (Prado *et al.*, 2008), o el daño a cultivos causados por plagas; de estas otras aplicaciones, también se incluyen unos ejemplos para mostrar la variedad y flexibilidad de usos de estas imágenes.

Evaluación de daños en los manglares y cambios en la línea de costa causados por el huracán Wilma en la Riviera Maya

Entre los daños más importantes causados por Wilma en la Riviera Maya en 2005, se pueden mencionar la reducción significativa de la superficie de las playas debido a la erosión causada por el viento y el oleaje; lo que en casos extremos significó la desaparición total de la playa (Peralta *et al.*, 2007). Esta es una zona particularmente vulnerable debido a que cuenta con una topografía prácticamente plana, compuesta por un substrato calcáreo formado por arrecifes antiguos, altamente permeables, con cenotes y ríos subterráneos y donde los manglares y las dunas costeras juegan un papel muy importante en la protección del ecosistema y de la línea de costa.

La vegetación de mangle en los pantanos y humedales, así como la selva dentro del territorio, se vieron severamente afectados por este fenómeno meteorológico que tuvo una magnitud 5 en la escala Saffir-Simpson. Entre los esfuerzos realizados para evaluar los daños causados a las playas y los manglares, se llevó a cabo un levantamiento aéreo a lo largo de la línea de costa en un área particularmente afectada. Esto se hizo con imágenes digitales de alta resolución en color e infrarrojo, a partir de las cuales se generó un ortomosaico de la zona y, como ya existía una cartografía previa (también un ortomosaico de imágenes digitales), fue relativamente sencillo llevar a cabo una evaluación de los cambios, con la ayuda de un SIG. De esta manera, la información sobre la magnitud de los daños y las condiciones actuales de la vegetación, así como la distribución de los nuevos depósitos de arena y la localización de la línea de costa, se obtuvieron en unos cuantos días. En la Figura 2 se muestra una comparación entre imágenes en color de 2004 y de 2005, donde es muy evidente el daño sufrido en el manglar. En este



caso fue importante contar con cartografía previa, ya que esto permitió hacer un seguimiento temporal de estos procesos naturales, así como monitorear las etapas de recuperación de la vegetación y los cambios en la línea de costa desde una perspectiva humana.

En la Figura 3 se muestra un mosaico de la zona en estudio, donde se aprecia el daño, ocurrió en los límites de la costa y en aquellas zonas tierra adentro, desplegadas en color café, donde la vegetación fue severamente dañada.

Cambios en la cubierta vegetal en la zona de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca

La Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) es una zona de aproximadamente 765 km^2 cubierta de bosque templado, que se localiza entre los límites de los estados de México y Michoacán, y que ha sido ampliamente estudiada a través de la fotografía aérea digital de pequeño formato. Desde 1999 en que se hizo el primer levantamiento, se formó un mosaico semicontrolado de la zona (Peralta Higuera *et al.*, 2001c), mismo que, entre otros criterios, sirvió para redefinir la nueva Reserva, a través de un decreto presidencial publicado en el 2000 (DOF, 2000). A partir de la primera campaña aérea se ha tratado de hacer un levantamiento anual, con la finalidad de evaluar los cambios en la cubierta vegetal, primero para saber cuál es la evolución de este importante ecosistema, no solo por ser el refugio de la Mariposa Monarca, sino también por los servicios ambientales que proporciona. A partir del 2003, en que se efectuó el primer mosaico ortorectificado de esta zona, la evaluación de los cambios se ha podido realizar de una manera más sencilla. Se han definido diferentes clases que determinan el estado de la cubierta vegetal, atendiendo a su densidad, en: cerrada, semicerrada, semiabierta, abierta y pastizales. Por un lado, los métodos de análisis se han mejorado sustancialmente con respecto a los primeros años (López, 2009) y adaptado a las condiciones particulares de la zona, considerando todos los factores que en ella intervienen, como por ejemplo la tala ilegal, el ecoturismo, la protección que algunas comunidades brindan al bosque y los procesos de reforestación. Por otra parte, los métodos de obtención de imágenes y de formación de mosaicos ortorectificados se han optimizado y las imágenes han contado cada vez con una mejor resolución (Tabla 1) lo que ha permitido discriminar árboles individuales, matorrales, pequeñas veredas bajo el do-

◀ Figura 2. Comparación con imágenes de 2004 arriba y de 2005 abajo, después del impacto del huracán Wilma.

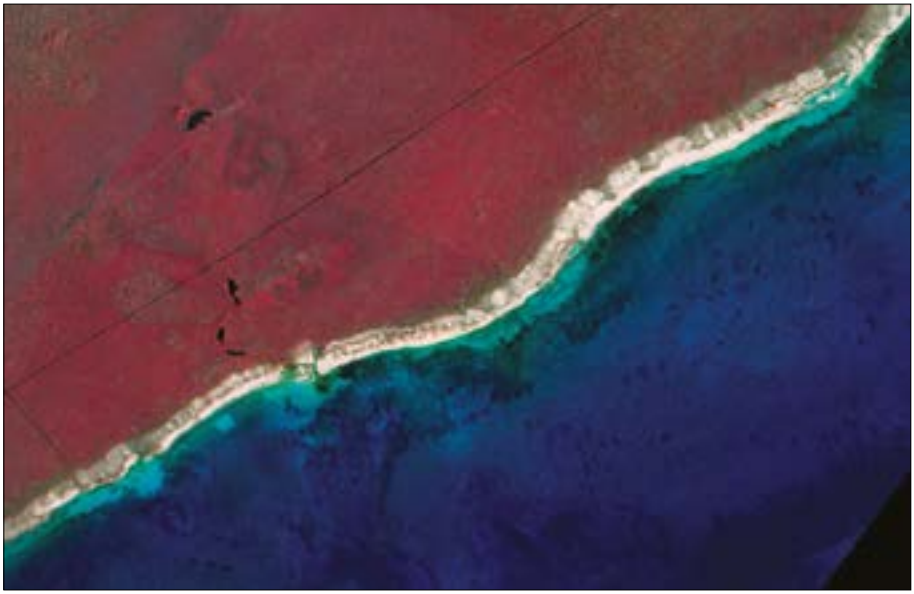


Figura 3. Mosaico ortorectificado, formado a partir de imágenes multiespectrales.

sel, árboles derribados y vehículos. La calidad de la evaluación es tal, que por una parte permite determinar cambios en zonas tan pequeñas como 100 m^2, lo que lo hace un método bastante confiable, y por la otra, permite el pago por servicios ambientales a los ejidatarios que participan en el programa. Se han llevado a cabo importantes esfuerzos por reducir los errores en las evaluaciones anuales, tratando de estandarizar el método lo más posible, por una parte, se ha tratado que cada vez sean los mismos especialistas los que lleven a cabo la interpretación de las imágenes, los levantamientos aéreos han seguido la misma altura y líneas de vuelo, e inclusive se han repetido evaluaciones de años anteriores y se han hecho combinaciones bianuales o de periodos de hasta seis años, todo con la finalidad de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los resultados. Los grandes esfuerzos en gestión ambiental con las comunidades han permitido frenar la deforestación en la zona de la Reserva de 538 ha en 2005 a 53 en 2009 (WWF, 2009).

Identificación de cambios de uso de suelo y afectación de cultivos por plagas en el estado de San Luis Potosí, México

En este proyecto se llevó a cabo un levantamiento de un área que abarca 1 750 km^2 aproximadamente, en San Luis Potosí, para identificar los cambios en el uso de

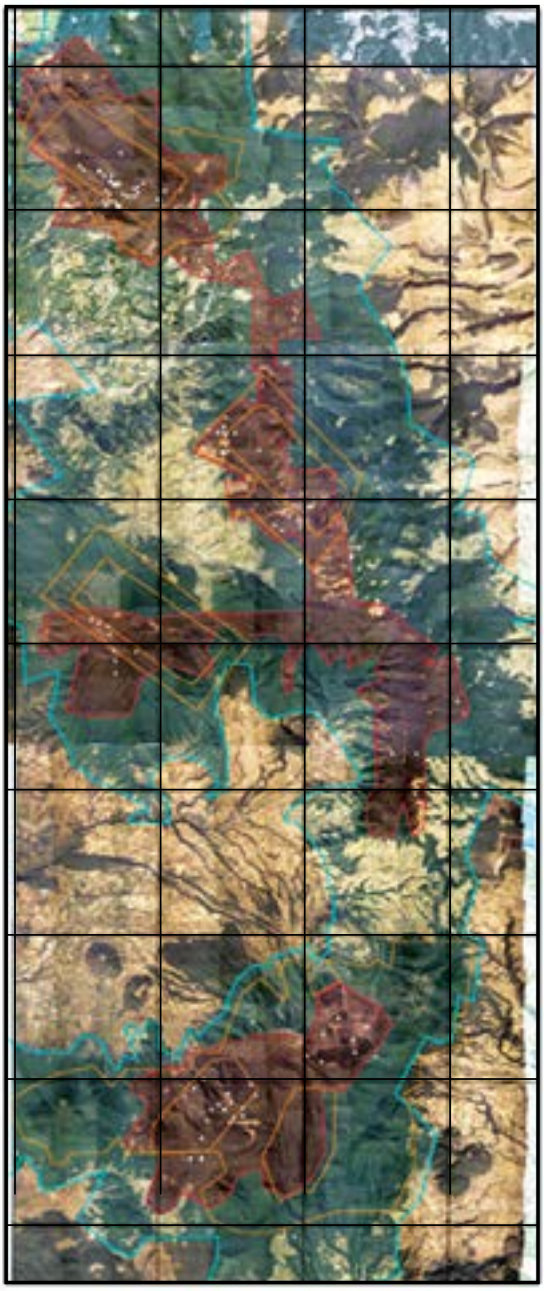


Figura 4. Mosaico semicontrolado del área donde se ubica la RBMM. Las líneas en naranja muestran las áreas protegidas antes del decreto del 2000; y en rojo y azul, se muestran las nuevas zonas núcleo y de amortiguamiento, respectivamente.

suelo y los daños causados por plagas en los tres cultivos principales de esta zona; todo esto con el objetivo último de establecer una metodología para llevar a cabo evaluaciones rutinarias. El área en estudio comprende zonas altas y planicies bajas, las primeras tienen una altitud promedio de 1 300 m, donde se produce café, y en las planicies (de 50 a 200 m) existen cultivos de caña de azúcar y cítricos. Se adquirieron imágenes visibles e infrarrojas a una altura promedio de 3 200 m snmm con una resolución de 0.40 m en las partes altas y de 0.70 m en las planicies. Las imágenes visibles e infrarrojas fueron separadas en bandas, registradas e integradas para generar imágenes multiespectrales en falso color (Figura 5), ortocorregidas y ensambladas en un mosaico.

La detección de las plagas se realizó a través de la interpretación con imágenes IR, estereopares en color, compuestas en falso color y también se efectuaron algunos procesos de clasificación automáticos (Prado *et al*., 2007). Estos resultados fueron integrados con el ortomosaico de la zona y comparados con observaciones de campo para evaluar coincidencias y omisiones.

El daño infringido por la langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons Walker*) en los sembradíos de caña de azúcar se distinguió fácilmente, sin embargo, en algunos casos se confundió por algunos efectos de las condiciones del suelo. Hubo bastantes problemas para detectar los daños en los cafetales, causados por la broca del café (*Hypothenemus hampei*), esto es debido a que las plantas por lo general se encuentran bajo la sombra de otras especies vegetales y no pueden observarse directamente, ni tampoco alguno de sus efectos a través, o en el dosel de la vegetación que los cubre. Es necesario buscar un método alternativo de identificación de daños, que hasta la fecha no están muy extendidos en la zona. Algo parecido ocurrió con las plantaciones de cítricos, donde los efectos de la calidad del suelo, la humedad y las prácticas de manejo enmascararon el papel que jugó la mosca de la fruta (*Anastrepha Ludens*) en las afectaciones a los cultivos. En este caso fue necesario incrementar de manera significativa el trabajo de campo para hacer las comparaciones y establecer criterios más adecuados de evaluación de las zonas afectadas. Finalmente, lo que sí resultó de manera inequívoca, fue el hecho de los cambios de uso de suelo debidos a las actividades económicas y la deforestación, ya que estaban directamente ligados a la aparición de las plagas en la zona. Las imágenes aéreas digitales de alta resolución resultaron útiles en la detección de plagas de langosta y la mosca de la fruta, no así para la broca del café, por lo que su aplicación debe enfocarse solamente en las planicies, donde se ubican estas especies nocivas.

Figura 5. Compuesto de falso color para apoyo a la interpretación de las zonas afectadas por plagas.

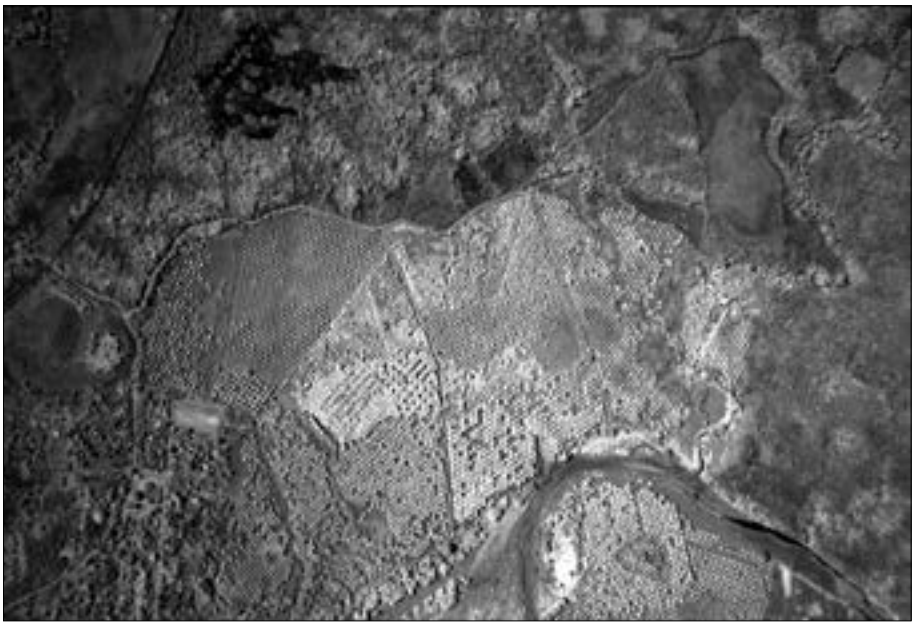


Figura 6. Imagen infrarroja de un cultivo de cítricos, donde se aprecian los cambios en el contenido de clorofila con respecto al entorno.

Validación en la interpretación de especies vegetales en el Inventario Forestal Nacional 2000

Para validar la interpretación de las especies vegetales en México, que fue realizada a partir de imágenes LANSAT ETM+, se estableció una estrategia novedosa a través del uso de imágenes aéreas digitales de alta resolución; la finalidad era la de evitar el costoso y tardado trabajo de campo (Mas *et al.*, 2002). Para llevar a cabo los levantamientos aéreos se utilizaron dos naves Cessna 441 para cubrir completamente el territorio nacional con líneas de vuelo, como se muestra en la Figura 7, en transectos separados en una trama de 50 km en la parte central y sur de la República, y de 100 km en la parte norte. La diferencia se debió a la variedad de especies y ecosistemas que existen en ambas zonas, siendo la parte norte la que cuenta con menor número de ellos. Se tomaron aproximadamente 53 000 imágenes con una resolución promedio de 1 m, lo que permitió identificar positivamente a la gran la mayoría de las especies vegetales (Palacio *et al.*, 2000).

El éxito en la interpretación se debió no solo al color y a la calidad de las imágenes, sino también a la experiencia de los especialistas, a sus amplios conocimientos de sus respectivas zonas de estudio y al trabajo de campo previo. La poca

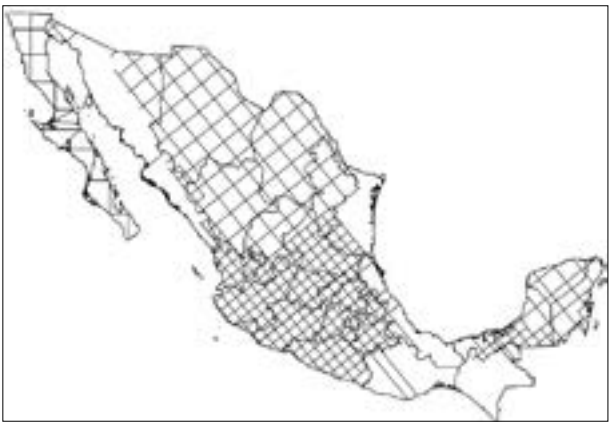


Figura 7. Transectos de vuelo efectuados a lo largo y ancho de la República Mexicana, para validar la interpretación de la cobertura vegetal en el Inventario Forestal Nacional, 2000.

disponibilidad de aeronaves, condiciones meteorológicas adversas y problemas de tiempos de entrega del proyecto, solamente el 62% de las líneas de vuelo fueron cubiertas, sin embargo, la exactitud total estimada en los mapas elaborados para el inventario forestal fue de 78%, con un total de 25 000 puntos de verificación procesados, para un total de 70 clases vegetales. Las matrices de error fueron construidas comparando los puntos seleccionados al azar *vs.* la interpretación en el mapa y la imagen digital (Peralta Higuera *et al.*, 2001b).

Monitoreo del área de conservación ecológica al sur de la Cuenca de México

Por muchos años esta zona de conservación ecológica ha sido afectada por asentamientos humanos irregulares y por cambios en el uso de suelo. La presión demográfica que ejerce una de las ciudades más pobladas del mundo, obliga a un monitoreo constante de esta importante área, cuyas funciones como resumidero de carbono y de captación de agua son fundamentales para la subsistencia de la propia ciudad. En 2005 se llevó a cabo un levantamiento aéreo y el mosaico se muestra en la Figura 9, éste se compone de 1 386 imágenes con tamaño de píxel entre 0.4 y 0.8 m, resolución suficiente para detectar pequeñas construcciones, aun debajo de los árboles; dentro de los polígonos amarillos se encuentra la zona de conservación ecológica. Con este mosaico se efectuó una comparación con uno previo (2001), evaluando los cambios en el periodo 2001 a 2005, donde se detectaron nuevos asentamientos en una zona de 6 300 ha (Peralta Higuera *et al.*, 2005).

En este proyecto se trató de llevar a cabo la clasificación automática de las zonas de conservación donde ocurrieron cambios, aplicando las mismas técnicas que se utilizan en las imágenes satelitales, sin embargo, la variabilidad en la imagen debido a las condiciones atmosféricas y de iluminación presentes en varios

Figura 8. La resolución de las imágenes permitió una identificación positiva de las especies, al poder distinguir árboles individuales. Abajo se muestra un acercamiento de la imagen.

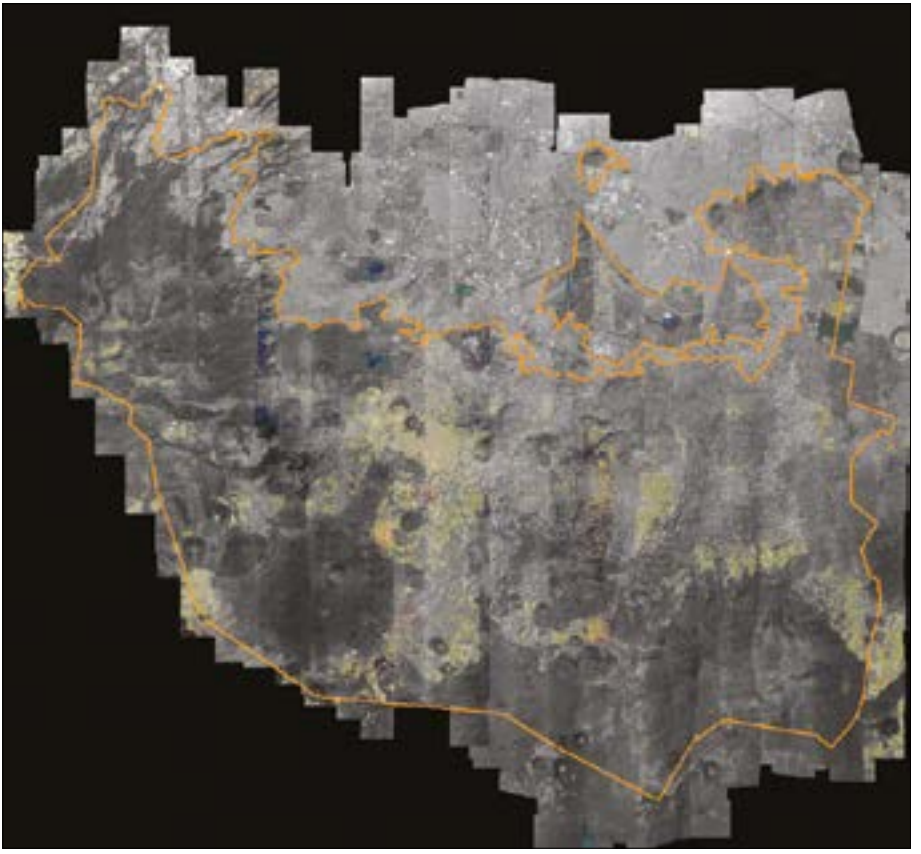


Figura 9. Ortomosaico del sur del valle de México, generado con fotografías de varias campañas aéreas del 2005.

levantamientos, que tomaron muchos meses en efectuarse, son factores a considerar. Si bien la imagen digital de pequeño formato permite un amplio margen de ajustes, éstos deben aplicarse de manera consistente, y definitivamente, es necesario contar con las bandas adecuadas para obtener resultados tanto en índices de vegetación, como en las clasificaciones, para que sean equivalentes a aquéllos obtenidos con las imágenes satelitales.

Manejo de subcuencas en el valle de México

La zona oriente del valle de México, considerando todas sus subcuencas asociadas, sufre de deforestación, inundaciones, tormentas de polvo, una erosión

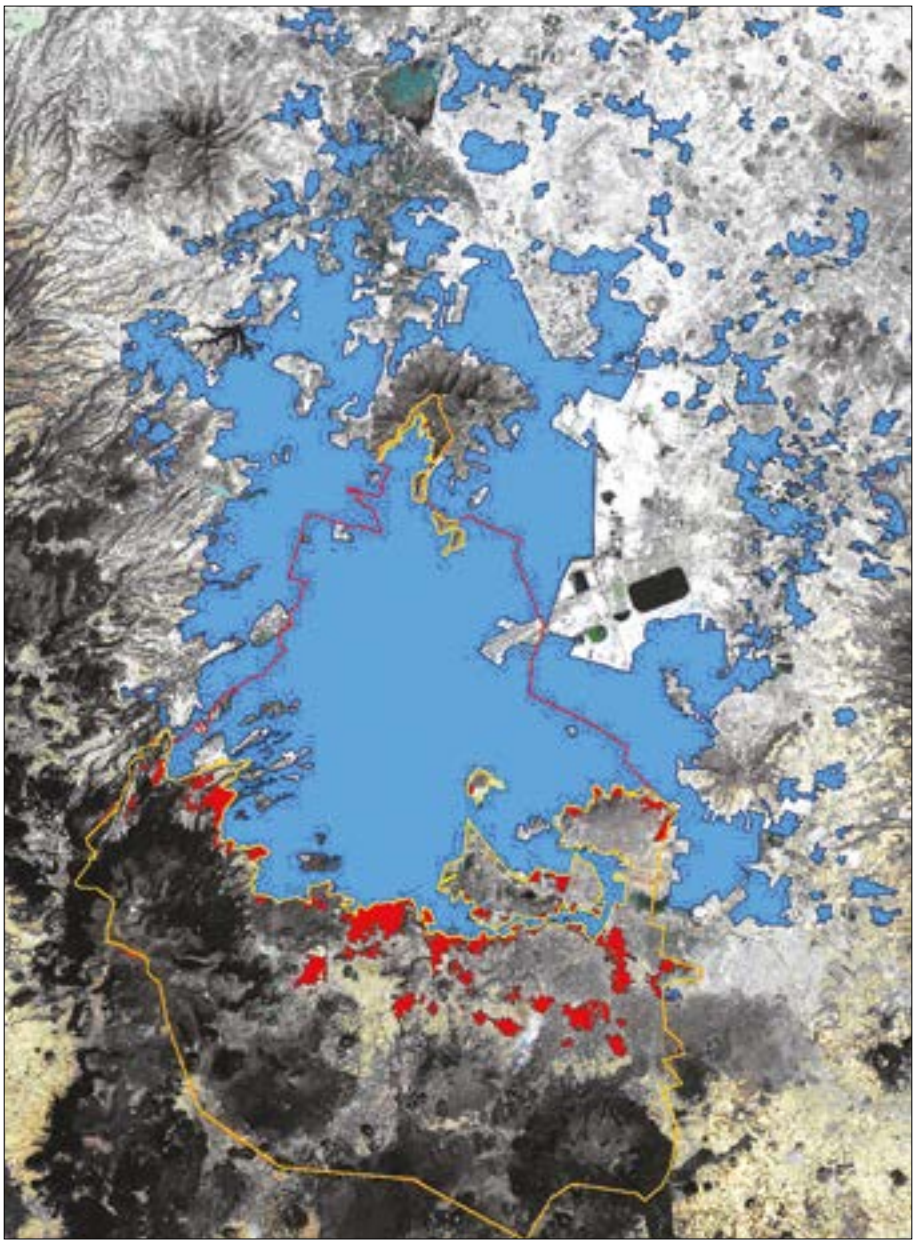


Figura 10. Los polígonos en rojo indican las zonas de invasión al área de conservación ecológica.

severa y cambios no planeados de uso de suelo. Varios proyectos financiados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) se han llevado a cabo para evaluar las condiciones de la vegetación y tratar de implementar prácticas de conservación en la zona. En 1997 se efectuó un primer levantamiento con fotografía digital en color, generándose un primer mosaico de la zona (Figura 11) y en el 2000, en una segunda campaña aérea, se añadió otra cámara para obtener imágenes infrarrojas, que sirvieron para mejorar significativamente los procesos de interpretación (Figura 12). Con las fotografías del segundo vuelo se generó un mosaico, con el que se efectuó un inventario de la infraestructura hidráulica, se monitorearon las zonas reforestadas y se evaluaron los cambios en el periodo 1997-2000 (Figura 12). En un tercer levantamiento se cubrió adicionalmente un área de alta salinidad de aproximadamente 200 km^2, con una resolución de 0.5 m, para evaluar con más precisión los avances de las distintas especies vegetales en su proceso de recuperación (Peralta Higuera *et al*., 2001a). Así que para el 2001, el área total de estudio aumentó hasta 2 000 km^2, debido al éxito de los programas de monitoreo de los procesos estudiados y para incluir también los programas de irrigación.

Monitoreo de Áreas Naturales Protegidas y generación de cartografía en islas y cayos

Es de particular importancia monitorear el estado de los recursos naturales y preservar aquellas zonas declaradas como Áreas Naturales Protegidas (ANP), mismas que entraron en esa categoría después de un proceso de evaluación de sus características, efectuado por expertos de diferentes disciplinas. Este proceso de monitoreo se lleva a cabo a través de levantamientos regulares que efectúa personal de la Comisión Nacional de Áreas Protegidas, de manera independiente, a partir de un entrenamiento que se les proporcionó para efectuar levantamientos aéreos con cámaras de pequeño formato (Carranza *et al*., 2003). Por otra parte, existen algunas islas y cayos en México que no contaban con cartografía actualizada, en particular la Isla Isabel, localizada a 60 km al sur de Nayarit, que es refugio temporal de pescadores pero hábitat de distintas especies de aves. Para llevar a cabo estudios de impacto ambiental en esta zona se generó un mapa a partir de imágenes obtenidas a dos alturas diferentes. Las imágenes del vuelo alto se usaron como referencia para la generación del mosaico con las imágenes del vuelo bajo.

Otro ejemplo similar ocurrió con Cayo Arcas que tiene una longitud aproximada de 1 km y que se localiza a 200 km al este de Ciudad del Carmen, Campeche. Este es un lugar de gran importancia para el refugio de aves, sin embargo, se encuentra rodeado por varias plataformas petroleras donde muchos buques tanque, provenientes de lugares como el lejano Oriente, descargan sus

Figura 11. Mosaico semi-controlado de la zona oriental de la Cuenca de México. Generado a partir de imágenes digitales obtenidas en el primer levantamiento aéreo de la zona, en 1997.

Figura 12. Imágenes visible y compuesta, utilizadas para monitorear procesos de reforestación, erosión e irrigación en la parte oriental de la Cuenca de México.

cisternas con agua que es utilizada como lastre; desalojándola en el mar antes de ser llenados con petróleo crudo. Se llevó a cabo un estudio integral de la zona, incluyendo la hidrodinámica del arrecife contiguo al cayo, y el mapa elaborado con imágenes digitales de alta resolución en color e IR, sirvió como cartografía base para dicho estudio. Finalmente, los resultados demostraron que el impacto en los corales, el agua y la arena no eran significativos, a pesar de la actividad petrolera en los alrededores.

Evaluación de desastres

La imagen aérea digital de alta resolución, obtenida con cámaras de pequeño formato, ha demostrado ser un medio muy rápido y conveniente para determinar la magnitud de un desastre. Aun con la presencia de nubes, las cámaras digitales son suficientemente sensibles para obtener imágenes útiles. En algunos casos, donde el área no es muy extensa (*i.e.* decenas de kilómetros cuadrados), doce

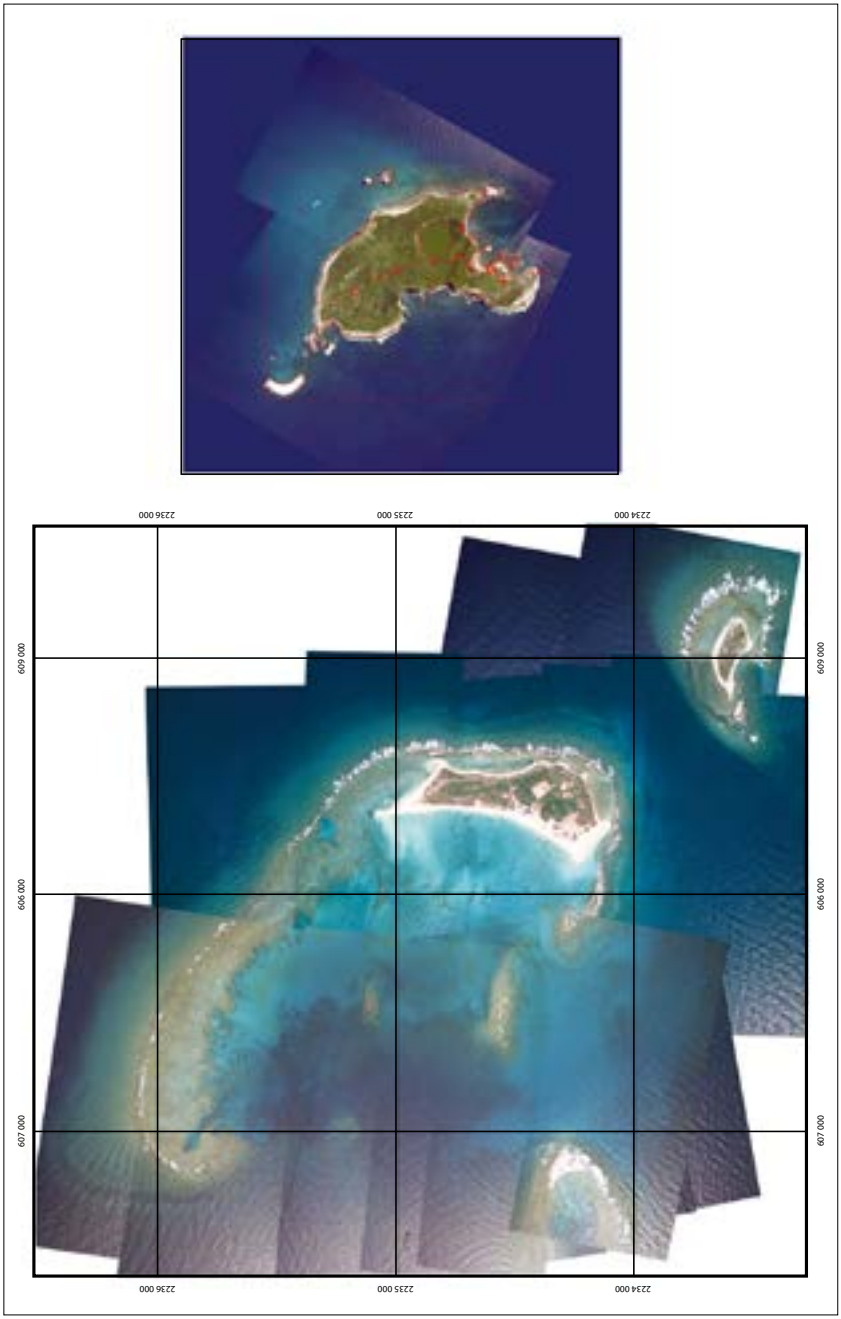


Figura 13. Actualización de los mapas de la Isla Isabel, Nayarit y de Cayo Arcas, Campeche, utilizando imágenes aéreas digitales de pequeño formato.

horas han sido suficientes para adquirir las imágenes y formar un mosaico semicontrolado, usando una cartografía base de la zona devastada. El contenido en color e IR, permite una evaluación rápida a través de los estereopares. Como ejemplo, lo ocurrido en 1998 cuando una avalancha de lodo cubrió muchas viviendas en el pueblo de Pijijiapan, localizado en la planicie costera en el estado de Chiapas, México (Figura 14). Posterior a la emergencia, un mosaico de imágenes de pequeño formato que abarcaban una zona más amplia, junto con imágenes de satélite, fueron utilizados para generar el mapa de riesgos, con la intención de establecer programas de reubicación de la población.

En otro caso de inundación, ocurrido en el 2000 en una zona densamente poblada en las afueras de la Ciudad de México, las imágenes en color e IR resultaron de capital importancia para evaluar las afectaciones en las viviendas, después de que la pared de un dique de aguas negras cediera ante la presión del agua. En este caso particular, la utilidad de la imagen IR se puso de manifiesto al permitir la delimitación exacta de la inundación a unas cuantas horas de haber ocurrido el desastre. Desafortunadamente el mismo problema se presentó diez años después; los hundimientos diferenciales del terreno son los causantes de las fracturas de las paredes del dique. La zona inundada en esta ocasión fue prácticamente la misma y se espera que las autoridades tomen algunas medidas de prevención para que esto no ocurra nuevamente.

Discusión

Grandes levantamientos

La sensación de que las imágenes aéreas digitales de alta resolución no eran adecuadas para llevar a cabo levantamientos de grandes extensiones de territorio, debido a la gran cantidad de fotografías que era necesario procesar, en comparación con las imágenes obtenidas con cámaras aerofotográficas convencionales, fue sobrepasada muy pronto. Para 1997 el Instituto de Geografía de la UNAM, llevó a cabo el primer levantamiento aéreo de la porción oriental de la cuenca de México, efectuando un primer mosaico semicontrolado de la zona. A partir de esta experiencia se comenzaron a utilizar las imágenes aéreas digitales en otros proyectos en México, debido al éxito alcanzado, sobretodo en la etapa de interpretación, que a su vez fue consecuencia de la buena resolución y calidad de las imágenes, el procesamiento casi inmediato y su inclusión directa a un SIG.

Posteriormente, a principios de 1999, se hizo un levantamiento de la laguna de Agua Brava en Nayarit, México, con la finalidad de efectuar un estudio de

Figura 14. Mosaico de la zona de desastre en el pueblo de Pijijiapan. La inundación cubrió muchas viviendas en octubre de 1998, a consecuencia de lluvias torrenciales en las partes altas.

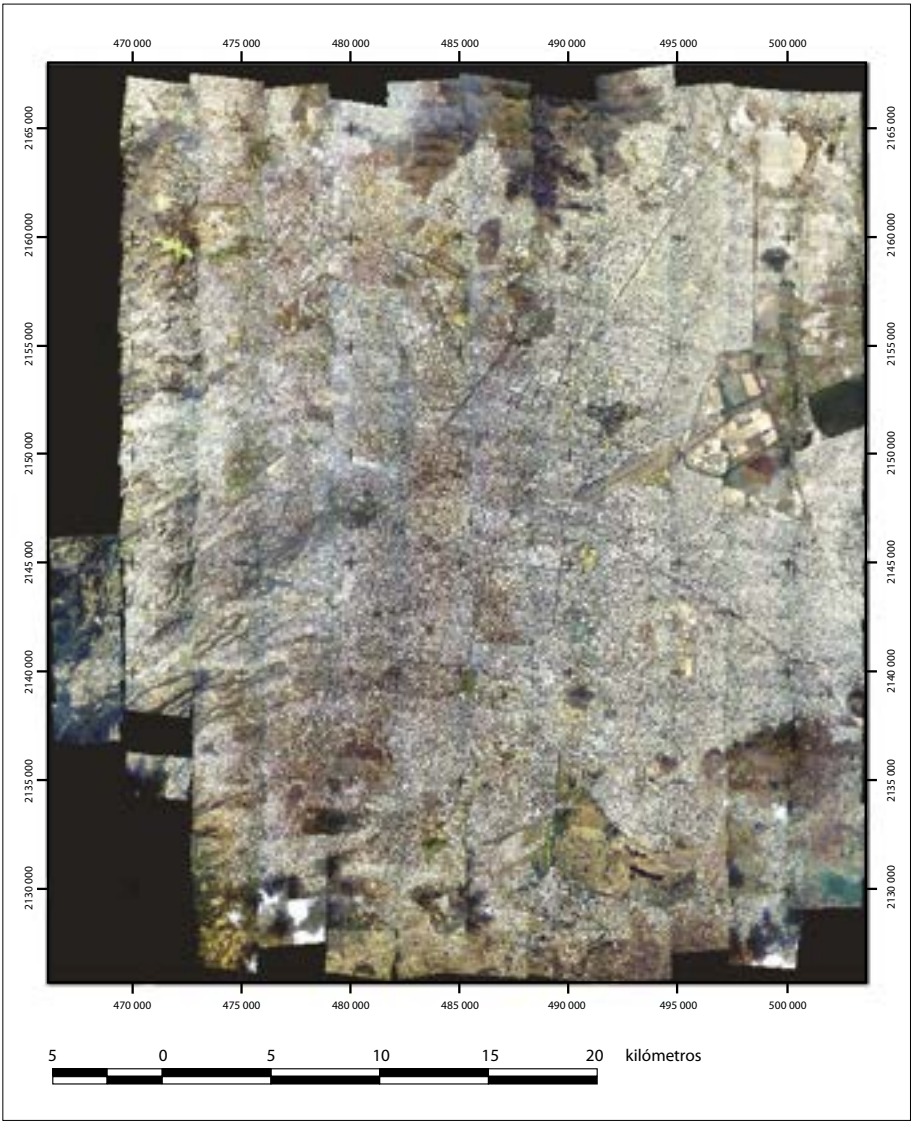


Figura 15. Primer ortomosaico del Valle de México, generado a partir de 450 imágenes digitales de pequeño formato.

impacto ambiental, cubriendo un área de 1 225 km^2 y con un tamaño de pixel de 2.1 m. Para ese mismo año, se comenzaron los levantamientos aéreos en la Reserva de la Mariposa Monarca; en la primera campaña aérea se efectuaron 14 transectos y se utilizaron 600 imágenes para formar el mosaico semicontrolado, cubriendo un área aproximada de 765 km^2. Cabe mencionar que la zona de la Monarca y la Cuenca de México se fotografían de manera rutinaria en periodos de 1 o máximo dos años, entre cada campaña de vuelo. Para el 2000, se efectuó un levantamiento aéreo de la Cuenca de México, cubriendo un área de 1 400 km^2, formando un mosaico ortorectificado, es decir, un arreglo secuencial de imágenes contiguas que han sido corregidas geométricamente y que poseen la calidad de un mapa. Dicho mosaico se formó a partir de 540 imágenes, cada una de ellas con una cobertura de 4.5 x 3.1 km con una resolución de dos metros (Figura 15). Los mosaicos ortorectificados son obtenidos en la actualidad a través de procesos bien establecidos (Prado J. *et. al*., 2006; López F., 2006; Ramírez M. A., 2011), lo que permite cubrir áreas del orden de 3 600 km^2 y obtener mapas con errores dentro de estándares, como los establecidos por la American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2011).

Conclusiones

Como lo demuestran los diferentes ejemplos mostrados en este capítulo, las imágenes aéreas digitales de alta resolución obtenidas con cámaras de formato pequeño representan una opción adecuada y, en algunos casos, muy rápida para llevar a cabo diferentes estudios. En todos aquellos proyectos donde sea necesaria una alta resolución espacial y temporal, y existan restricciones económicas y se requiera de una gran flexibilidad operativa, la imagen digital de pequeño formato ofrece ventajas significativas. Como era de esperarse, la tecnología ha jugado un papel preponderante en el desarrollo de estos sistemas de percepción remota, al proveer imágenes de mayor resolución y mejores programas de computadora para llevar a cabo la corrección geométrica y la formación de los mosaicos. Sin embargo, un aspecto que es indispensable también apoyar, es el desarrollo de personal altamente especializado en la interpretación y análisis de las imágenes.

Para llevar a cabo la evaluación de desastres, la imagen aérea digital de pequeño formato ha demostrado ser un material adecuado, ya que los equipos de adquisición de imágenes pueden montarse en prácticamente cualquier aeronave convencional e inclusive en sistemas no tripulados, lo que permite hacer un estudio en unas pocas horas.

Capítulo 5. Distribución de aves rapaces en Los Tuxtlas: un acercamiento espacio-estadístico

José Antonio Quintero Pérez
Ana Rosa Rosales Tapia
Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Dada su situación geográfica, México se caracteriza por una gran cantidad de ambientes diferentes que permiten la existencia de un número muy elevado de fauna silvestre. De ésta, las aves constituyen un grupo muy diverso, con aproximadamente 1 018 especies (Peterson y Chaliff, 1998) distribuidas a través del territorio nacional. Para estructurar una estrategia apropiada para el manejo de estos recursos, es necesario conocer ampliamente los diferentes aspectos biológicos de estos animales (Flores y Gerez, 1988), desde su distribución geográfica, sus hábitos de alimentación, reproducción y migración, hasta su fisiología y bioquímica. Desafortunadamente algunos grupos de aves que están muy bien representados en México, como el orden de los Falconiformes, han sido poco estudiados por las dificultades que esto implica como su observación e identificación, así como su captura, actividades que implican técnicas especializadas y complicadas (Newton, 2000).

A pesar de las dificultades arriba mencionadas, es muy importante estudiar estas especies que se encuentran en la parte superior de la cadena alimenticia, en densidades muy bajas en comparación con la gran mayoría de las aves (Brown y Amadon, 1989), y que son extremadamente sensibles a los cambios inducidos en su hábitat por las actividades antropogénicas. Esta vulnerabilidad le da a esta ave de presa, además de su importancia como eslabón en el ecosistema, un papel muy importante como indicador ambiental (Burton, 1989), en parte debido a la disminución en las poblaciones de algunas especies, como el halcón peregrino (*Falco peregrinus*) o el águila pescadora (*Pandion haliaetus*), (Johnson, 1981).

La fauna de la región neotropical de Los Tuxtlas es muy diversa en su biota y combina diferentes especies de origen neotropical y neoártico así como endé-

micas (Andrle, 1964; Dirzo, 1987; Ibarra y Sinaca, 1987; Pérez *et al*., 1987). Los Tuxtlas es el hogar de más de cien especies migratorias (Winker *et al*., 1992) que convergen en esta región a lo largo de dos importantes rutas migratorias: aves que siguen la costa del Golfo de México, y aquéllas que vuelan sobre el Golfo. De éstas, un gran número se clasifica en alguna categoría de riesgo como la de especies amenazadas por la lista roja de la IUCN[5] y CITES.[6] Se encuentran particularmente amenazadas aquellas especies de aves insectívoras, carnívoras o las que dependen del follaje, las especies que tienen un sistema social territorial y requieren recursos especializados del hábitat, aquéllas con bajas tasas de reproducción o que anidan cada dos o tres años y son objeto de caza o son comercializadas (Ramos, 1985).

Los Tuxtlas, considerada un área de alta prioridad para la conservación de aves en México (Waugh y Pérez-Gil, 1992) contiene más de 40 especies de Falconiformes; sin embargo, fuera de los registros generalmente esporádicos no ha habido un estudio sistemático sobre este importante grupo en la región de Los Tuxtlas. Este estudio da un paso más en la construcción del conocimiento sobre estas aves rapaces por medio de la descripción de la distribución espacial del género *Buteo*. El propósito de esta investigación es identificar no solo la distribución actual de este género, sino también obtener información actualizada sobre las preferencias de su hábitat.

Problemas de conservación

Como en el caso de la mayoría de las especies silvestres, no es adecuado estudiar a las aves rapaces como un evento aislado. Éstas se encuentran en la cumbre de la cadena trófica y todo lo que afecta a la base de esta pirámide lo hace, por consiguiente, a la cima.

La urbanización, la industrialización, el uso de pesticidas y la persecución (por ejemplo, la caza) en muchos casos provocan la reducción de la población o incluso su extinción (Stotz *et al.,* 1996). La conservación de las aves rapaces debe comenzar con la protección y conservación de los hábitats y los ecosistemas en que viven. En Los Tuxtlas, la situación de las aves residentes, cuyos hábitos están íntimamente ligados a los bosques, es especialmente preocupante porque la des-

[5] International Union for Conservation of Nature (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza).

[6] Convention of International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (Convención de Comercio Internacional de Especies Amenzadas de Fauna y Flora Silvestres).

trucción de su hábitat tiene una consecuencia directa, animales como el águila arpía (*Harpia harpyja*) han desaparecido.

En general, se puede decir que la clave para la conservación de las aves es el correcto manejo forestal a fin de mantener un número adecuado de individuos sanos y vigorosos de cada especie. Al mismo tiempo, las poblaciones deben ser grandes y lo suficientemente resilientes para soportar los severos impactos ambientales: necesitan una proporción igual de sexos, así como una tasa de reclutamiento adaptada para mantener una población viable a perpetuidad (*Ibid*.).

Entre los componentes del hábitat que deben ser considerados están: aéreas para la alimentación, lugares para la reproducción y la crianza de los pollos, el hábitat adecuado para el invierno (o huracanes, en el caso de esta región), y el espacio suficiente para una dispersión normal de las aves juveniles, movimientos migratorios y otros comportamientos territoriales (Olendorff, 1993).

En los últimos años, el paradigma principal que ha dominado el manejo y la administración de las áreas naturales protegidas ha sido la integración de la conservación biológica con el desarrollo social sostenible. Este enfoque tiene sentido en cualquier país en vías de desarrollo, donde las áreas naturales protegidas presentan casi siempre asentamientos humanos. Estas áreas, por lo tanto, presentan una fuerte presión sobre sus recursos debido, entre otros factores, a las condiciones de pobreza extrema, la aplicación de políticas incompatibles con los esfuerzos de conservación y la falta de respaldo institucional para su administración.

Parte del territorio de México está cubierta por bosques, en particular el estado de Chiapas, y en menor medida Oaxaca y Veracruz (Pennington y Sarukhan, 2005), siendo este último donde los bosques han sido destruidos en gran medida y solo subsisten fragmentos de lo que alguna vez fue un extenso bosque de selva húmeda tropical; es en esta región donde se encuentra la Sierra de Los Tuxtlas. Algunos ecosistemas forestales aún existen en Los Tuxtlas pero con índices de deforestación que superan el 4% al año. Esto sugiere que de los 16 millones de kilómetros cuadrados de bosque que cubrían a esta región originalmente en la década de 1970, se ha producido una disminución de 10 millones de km^2 de vegetación relativamente intacta (Wilcox *et al.,* 1988; Wilson, 1988; Dirzo, 1991).

La preservación de la mayoría de las especies amenazadas depende principalmente de la protección y el adecuado mantenimiento de sus hábitats naturales y para las especies que evolucionaron con una distribución continua, la fragmentación en pequeñas poblaciones aisladas aumenta la susceptibilidad a la extinción. Estas poblaciones fragmentadas son vulnerables a una variedad de factores, incluyendo los eventos ambientales catastróficos, fluctuaciones demográficas,

epidemias y depredadores (Terborgh y Winter, 1980; Wilcox, 1980), además de estar sujetas a la deriva genética.

Historia natural del género Buteo

El género *Buteo* comprende 25 especies y se encuentra casi en todas partes excepto en Australia y gran parte de la India. Sus miembros son halcones de tamaño mediano con alas anchas y amplia cola; bien adaptados para planear y remontar. El género se desarrolló probablemente en América del Sur donde se encuentran varios géneros más primitivos similares. El nombre *Buteo* significa "halcón", un término que se refiere acertadamente a algunos halcones del viejo mundo pero es mal empleado para referirse a los buitres. El Halcón de Cola Roja *(Buteo jamaicensis)* es a menudo considerado el representante de este género (Bull y Farrand, 1995).

Clasificación

Reino: Animalia
Phylum: Chordata
Clase: Ave
Superorden: Neoghathae
Orden: Falconiformes
Familia: Accidpitridae
Género: *Buteo*

Hábitat

En general, este género construye su nido en el borde del bosque o en grandes árboles rodeados de zonas abiertas, pero también se pueden encontrar en áreas semi-abiertas con árboles dispersos. Su territorio principal se compone de grandes arboledas, rodeadas de campos con pastos para alimentarse y perchas sobresalientes en torres de energía, postes de cableado y árboles a orillas de las carreteras y cuerpos de agua. En las regiones más septentrionales les gusta permanecer cerca de los árboles de coníferas (Preston y Beane, 1993), sin embargo, más al sur se mantienen alrededor de los árboles caducifolios. Muchas aves son ocupantes durante todo el año de alguna región, aunque las aves del norte migran hacia el sur durante el otoño para escapar de los rigores del invierno.

Este género es un residente bastante común desde el nivel del mar hasta los 1 800 m sobre el nivel de éste en ambas costas mexicanas: en la costa del Pacífico, desde Sonora hasta Chiapas, y en el Golfo de México, desde Tamaulipas hasta Yucatán, incluyendo el Mar Caribe en Quintana Roo, y localmente en el interior desde la cuenca del Balsas a El Salvador y Honduras (Howell y Webb, 1995). El

área de distribución continental de este género es desde el suroeste de Estados Unidos y México hasta Ecuador y el norte de Argentina.

Hábitos alimenticios

Suelen cazar desde perchas pasando gran parte del tiempo en busca de presas desde una posición alta para alimentarse de una amplia variedad de especies utilizando sus poderosas garras como armas. El 80 a 85% de su dieta se compone de pequeños roedores, sin embargo, pueden capturar mamíferos tan grandes como conejos, reptiles y otras aves que constituyen el resto de su dieta. Los tordos machos de alas rojas son frecuentemente devorados debido a su visibilidad cuando cuidan sus nidos (Ferguson-Lees y Chistie, 2006), en términos generales, lo que cazan es típicamente una función de lo que está disponible, así como del tamaño y nivel de experiencia del halcón.

Reproducción

El género *Buteo* por lo general comienza a criar a los tres años de edad, tiende a ser monógamo, y busca una nueva pareja solo cuando la suya muere. Una señal segura de la época de reproducción y crianza durante la primavera es que el macho y la hembra se posan sobre el mismo árbol para cazar. Durante el cortejo, las aves vuelan cerca uno del otro en círculos, en vuelos con una duración de diez minutos o más, y usualmente el apareamiento viene después (DeGraaf y Rappole, 1995).

Los nidos son generalmente de 28 a 38 pulgadas de diámetro. A veces se utilizan año tras año y pueden ser de hasta 1 m de altura. Ambas aves construyen el nido utilizando hojas de árboles caducifolios aproximadamente de 4 a 21 m por encima del suelo. Los nidos son construidos con ramas, mientras que el revestimiento está formado por hojas y corteza que se depositan en el nido durante todo el año para mantenerlo limpio (Smith *et al.,* 2003). De uno a cinco huevos son puestos en la primera semana de abril siendo incubados durante unos 30 días, ambos padres ayudan en esta tarea, y los huevos eclosionan en intervalos de uno a dos días. Los machos llevan comida a la hembra mientras está en el nido y desgarran los alimentos para las crías inicialmente, dejándolo más tarde entero. A las crías les crecen plumas alrededor de los primeros 45 días (Ferguson-Lees y Christie, 2006).

Conducta

Estas aves son muy territoriales y su entorno puede variar en tamaño desde 0.5 hasta más de 5 en función de los alimentos, las perchas, y sitios de anidación

disponibles (Zeigler y Bischof, 1993). La hembra suele ser más agresiva alrededor del nido, mientras que el macho es más agresivo cuando se trata de los límites del territorio. Estas aves se elevan planeando con un movimiento ondulatorio, ascendente y descendente, sobre su territorio, principalmente en los días claros, en busca de intrusos.

Área en estudio

La cadena montañosa de Los Tuxtlas, cuyo nombre, según Andrle (1964) se deriva del dialecto Náhuatl *toxtli*, traducida al español como conejo, es un grupo de montañas que se originó por la actividad volcánica. Esta cordillera está situada en la llanura costera del Golfo de México en el sur del estado de Veracruz (Figura 1). La cordillera se divide en dos secciones, una al noroeste formada por el volcán San Martín Tuxtla (1 720 m), y la otra al sureste llamada Sierra de Santa Marta (1 650 m). Estas dos secciones están separadas por una depresión en la que se anida el lago de Catemaco, formado a partir de los cráteres de varios volcanes extintos (Figura 2).

La amplia gama de características fisiográficas, desde la playa al cráter, pasando por barrancas de laderas escarpadas, aunadas a la humedad y el clima tropical, conducen a una gran variedad de hábitats disponibles para la vida silvestre y una increíble diversidad de especies de aves (hasta 568 según algunos cálculos) dentro de un área relativamente pequeña (Pare *et al*., 1992). Como se mencionó anteriormente, la zona de Los Tuxtlas representa la mayor porción intacta y el último parche de bosque tropical lluvioso en el estado de Veracruz, además de ser la línea de frontera entre las regiones Neártica y la Neotropical del continente. Esta pequeña zona costera limitada por la Sierra de Los Tuxtlas es reconocida como una zona importante para aves migratorias de estas dos regiones contribuyendo también a la biota que da cuenta de su enorme variedad de taxones como: aproximadamente 2 500 especies de plantas, 80 pteridofitas (helechos), más de 1 200 insectos, 122 reptiles y anfibios, más de 561 especies de aves y alrededor de 128 mamíferos.

Muchas especies vegetales y animales que se encuentran aquí son exclusivos de México o de la zona, y no se encuentran en ninguna otra parte del mundo. La mayoría de los reptiles y anfibios están restringidos a pequeñas áreas aisladas de bosque de montaña. La región cuenta con la mayor diversidad de aves en México en términos de superficie comparable. Es también un refugio para muchas especies raras y amenazadas que han sido desplazadas de otras zonas de México,

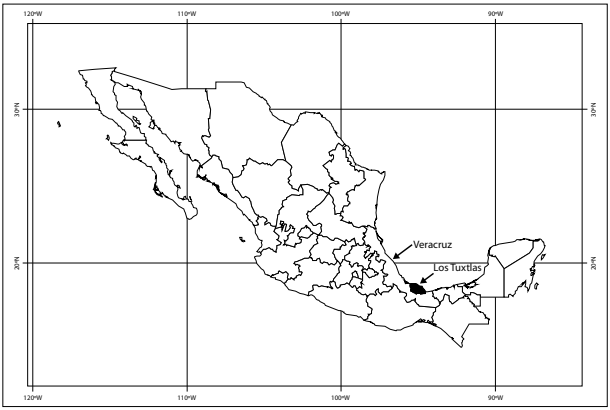


Figura 1. Ubicación del área en estudio.

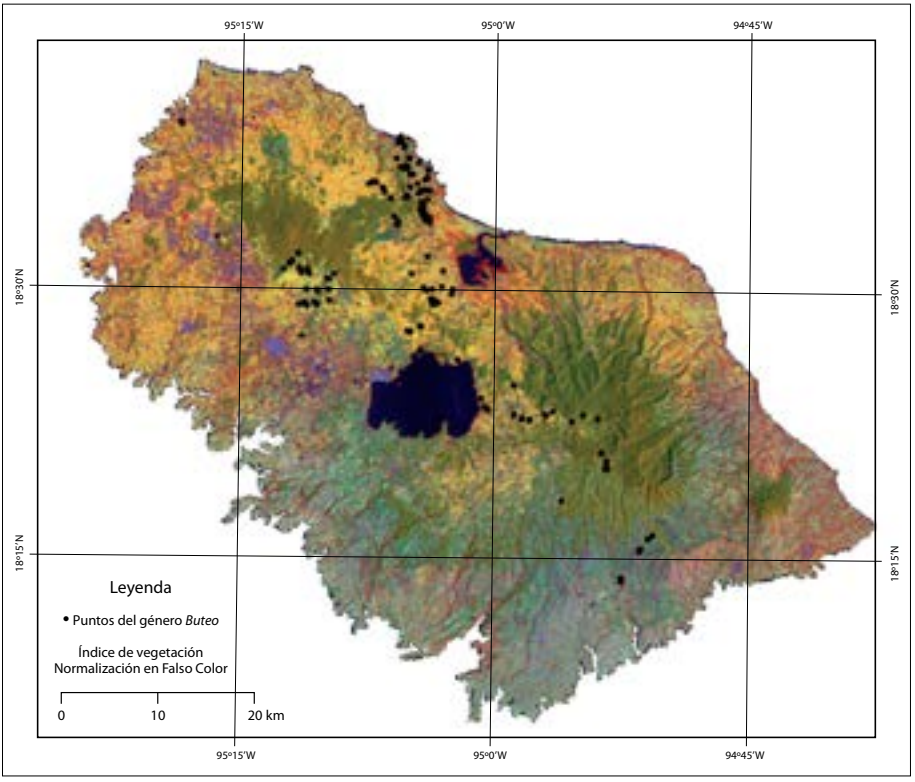


Figura 2. Los Tuxtlas, el área en estudio con los puntos de género *Buteo*.

entre ellos 19 especies de mamíferos en peligro de extinción (Dirzo y Miranda, 1992). La sierra de Los Tuxtlas se compone de siete volcanes mezclados con una variedad de lagos, lagunas y pantanos. Esta es la segunda zona más húmeda de México, con fuertes lluvias en verano y una precipitación media de 470 cm al año (Luna, 1994).

Por otra parte, dentro de esta zona se ubican más de 700 localidades, cuya población va en algunos casos de menos de diez habitantes, hasta las que superan los 50 000 (áreas urbanas). Muchas de éstas se localizan en las partes más planas, hacia los bordes del bosque y de los cuerpos de agua, sin embargo, se encuentran dispersas en toda el área en estudio, lo cual implica una gran presión para los relictos de bosque que se encuentran en el área por el cambio del uso de suelo (de forestal a pastizal inducido o de agricultura), desarrollándose las áreas urbanas y su infraestructura (Figura 3).

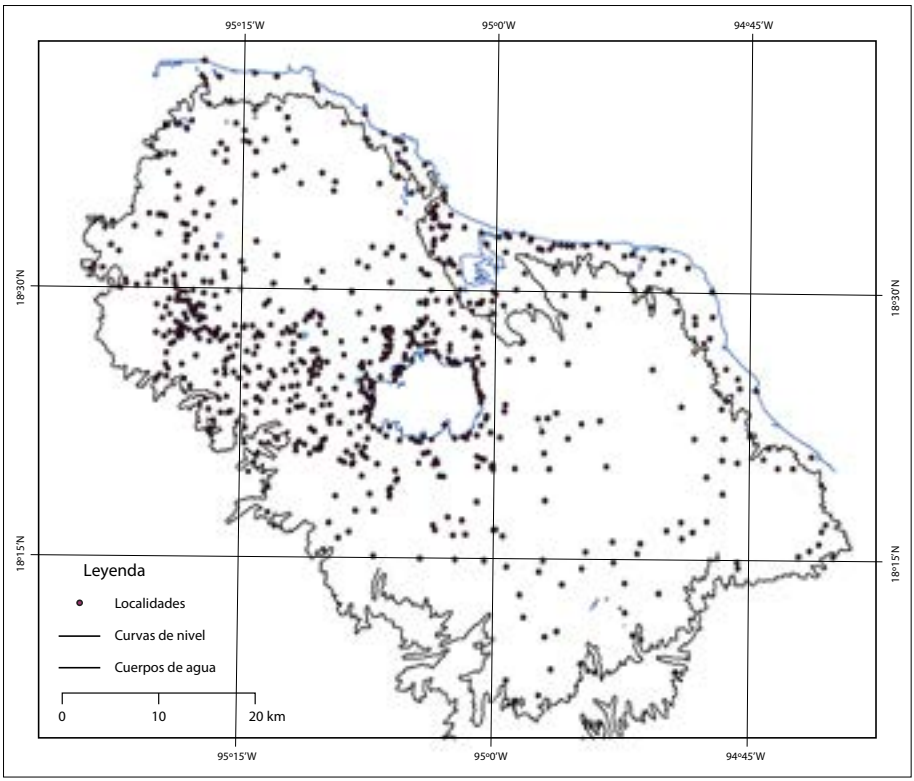


Figura 3. Localidades dentro del área en estudio.

Métodos

Objetivo

Identificar las preferencias de hábitat del género *Buteo* utilizando el análisis espacio-estadístico con base en una distribución conocida. Usando una metodología de cuadrantes y un análisis de regresión, se identificaron las variables que mejor describían la presencia de este género en el paisaje, discutiéndose los resultados con una base biológica y concluyendo con una explicación espacial de esta distribución.

Visión general

La comprensión de las preferencias de hábitat de las especies silvestres es importante, no solo para mejorar el conocimiento ecológico sobre esa especie, sino también para diseñar estrategias para la protección de su hábitat. En este sentido, es necesario desarrollar metodologías para cartografiar y monitorear de forma rápida y rentable estos paisajes para determinar su valor de conservación (Forman y Gordon, 1986). Esto es especialmente cierto en México donde el rápido cambio en el uso de suelo, resultante de la deforestación y el desarrollo agrícola (Gobierno del Estado de Veracruz, 1991; INE, 1993), ha ejercido presión sobre los hábitats naturales y semi-naturales y resulta urgente su conservación, como en Los Tuxtlas.

A pesar de que existe una cantidad considerable de información cualitativa que describe las preferencias de hábitat de diversas especies de aves rapaces, tales estudios con frecuencia no son bien representados espacialmente (Brown, 1974). Hasta cierto punto, esto es el resultado de las dificultades inherentes a la recopilación de la información del hábitat por métodos convencionales, incluyendo la interpretación de fotografías aéreas y trabajo de campo, y que posteriormente se tratan de cuantificar y georreferenciar para un análisis estadístico.

La posibilidad de clasificar grandes extensiones de tierra por medio de imágenes de satélite ofrece para ciertos tipos de paisajes y de flora y fauna silvestres, el aumento de oportunidades para desarrollar modelos cuantitativos de las relaciones entre coberturas de suelo, diversidad de especies y estimación de abundancia (Palma, 1997). El gran número de clases que se pueden extraer de las imágenes de satélite constituyen una base rigurosa para el desarrollo y ensayo de modelos estadísticos y ecológicos como apoyo a los sistemas de decisiones y modelos lineales generales. Los resultados de estos modelos se pueden aplicar a grandes áreas cubiertas por imágenes de satélite.

Este estudio presenta un análisis basado en una regresión múltiple de la distribución espacial de ocho especies de rapaces (*Buteo albonotatus* o aguilucho negro, *Buteo brachyurus* o halcón de cola corta, *Buteo jamaicensis* o halcón de cola roja, *Buteo lineatus* o halcón de hombros rojos, *Buteo magnirostris* o gavilán pollero, *Buteo nitidus* o halcón gris que se conoce también como el Azor Mexicano, *Buteo platypterus* o halcón aliancho y *Buteo swainsoni* o halcón de chapulinero) agrupadas en un solo género (*Buteo*) que serán nuestros puntos de observación o variable dependiente que es analizada en relación con dos clasificaciones de vegetación diferentes extraídas de una imagen de satélite (Landsat 7 ETM+), datos derivados de un modelo digital de elevación (MDE), hidrografía, y rasgos antrópicos como caminos y asentamientos humanos o variables independientes con la finalidad de establecer una dependencia entre el paisaje y el patrón de distribución existente.

Origen de los puntos observados

El conjunto de observaciones puntuales de este estudio representa 148 registros del género *Buteo*, resultado de 954 horas de monitoreo durante la época de secas y lluviosa del 2000 entre los meses de febrero y noviembre. Estas 148 observaciones del género *Buteo* fueron extraídas de una lista de 309, de las cuales 28 especies diferentes quedaron agrupadas en 13 géneros distintos. Solo el género *Buteo* se utilizó para este estudio por la cantidad de observaciones, otros géneros como *Accipiter, Circus, Micrasur* solo estaban representados por unas cuantas observaciones.

La lista final de 309 observaciones representa solo las aves cuyos datos (ubicación, altitud, y la información relevante como especie, género, edad, etc.) eran consistentes por las horas de estudio invertidas. Esto se hizo para asegurar que cada observación representara solo a un individuo y que fuera un residente permanente, dándole uso al hábitat con base en su conducta.

Datos de vegetación

La imagen de satélite que se utiliza en este proyecto viene del satélite LANDSAT 7, que utiliza el sensor ETM+ y que corresponde al *path/row* (columna/fila) 023/047 del 01 de abril de 2000 con una resolución espacial de 30 m en las seis bandas multiespectrales. Esta escena que corresponde a la temporada de estiaje, el inicio del estudio, fue orientada al mapa con la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), y cae en la zona 15 norte utilizando NAD27 (North American Datum 1927) y esferoide de Clarke 1866 como datum.

El proceso de registro de la imagen se realizó con PCI Geomatics, debido a que la interfaz gráfica ofrecía mejores soluciones. Para esta corrección geométri-

ca las cartas escala 1:50 000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) se utilizaron para generar los puntos de control terrestre. La imagen fue importada de su formato nativo (.HDF) en formato de PCI (.PIX), y después corregida radiométricamente, de 16 bits remuestreándola a 8 bits. Los Tuxtlas es una pequeña fracción de toda la escena y con el fin de acelerar todo el proceso la imagen original fue recortada utilizando el polígono del área en estudio.

De acuerdo con la literatura, la vegetación es sumamente importante para el orden Falconiformes, por lo que se generaron dos índices de vegetación a partir de la imagen de satélite, *Tasseled Cap* y *NDVI*. Éstos se compararon con el fin de probar cuál describe mejor la presencia de las aves rapaces dentro del área en estudio. El primer índice creado fue el *Tasseled Cap*, que se desarrolló para trabajar con las cuatro bandas originales del sensor MSS y después adaptado para trabajar con el sensor ETM+, ambos de la serie Landsat. Esta transformación se utiliza ampliamente en la investigación de cultivos identificando el brillo del suelo, la vegetación verde y la humedad, así como otros tres índices relacionados con propiedades atmosféricas (Jensen, 2004). De las seis transformaciones ortogonales calculadas por el índice *Tasseled Cap*, los dos primeros contienen la mayor parte de la información de la imagen, matemáticamente hablando, de los cuales solo se utilizó el verde de la vegetación o "índice de verdor" para este estudio que es generado multiplicando cada una de las bandas por su correspondiente coeficiente *Tasseled Cap* (Richards y Jia, 2005).

El segundo índice que se creó fue el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que utiliza las bandas TM3 (rojo visible) y TM4 (infrarrojo cercano) de la imagen. Este índice resalta la vegetación usando características intrínsecas de ésta representadas por el número digital en cada banda. La banda TM3 se utiliza para detectar la reflectancia verde generada por la clorofila en la vegetación (qué tan verde es la vegetación). La banda TM4 se usa para contrastar la vegetación viva y la muerta (qué tan brillante es la vegetación) además de que es sensible a la humedad superficial del suelo.

La fórmula del NDVI es también llamada fórmula multirradial simple, y se representa de la siguiente manera:

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

Este cociente multiplicado por 255 revela los valores de los intervalos de gris de la imagen y entran dentro de la proporción de las bandas más comunes en

percepción remota y como resultado de éste se obtiene una sola banda (Howard, 1991). Este índice se utiliza para mejorar la discriminación entre suelo y vegetación, y para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en las clasificaciones espectrales de las diferentes coberturas vegetales (Hashimoto *et al.*, 1993).

Componentes vectorial y raster

Para obtener los datos de elevación del área en estudio se generó un modelo digital de elevación (MDE) del terreno a partir de las curvas de nivel escala 1:50 000 de INEGI con una resolución de 20 m utilizando la extensión *Spatial Analyst* de ArcGIS. Así mismo, utilizando este MDE se extrajeron las pendientes en grados de inclinación y el aspecto u orientación de las laderas en grados radiales.

Los datos vectoriales correspondientes a los ríos y cuerpos de agua, así como las actividades antrópicas representadas por las vías de comunicación (pavimentadas y terracerías) y las localidades tanto puntuales como poligonales también se obtuvieron de las cartas de INEGI escala 1:50 000. A estos vectoriales se les generaron *buffers* o polígonos de influencia para obtener las distancias del rasgo hacia afuera como un parámetro de proximidad a éstos, siendo una propiedad del espacio que por ser topológica deberá demostrar alguna relación espacial con nuestros puntos de observación. Estos productos secundarios del análisis de proximidad son rasterizados mediante la extensión S*patial Analyst* con un tamaño de píxel de 20 m con la finalidad de poder utilizar esta información junto con los derivados del MDE y los índices de vegetación obtenidos en un solo modelo.

Una vez más, retomando la literatura relacionada a este género que hace referencia a los diferentes usos de los espacios, se tiene que el factor humano está presente y una manera de representarla en nuestro modelo es considerando las áreas urbanas que se encuentran en la zona en estudio y que a su vez presentan una organización espacial de conectividad mediante las vías de comunicación, por lo cual son considerados estos dos rasgos. Aunado a éstos, la presencia del agua es un factor a tomar en cuenta ya que la literatura nos dice que de manera indirecta estas aves dependen de la cacería de otras especies que se encuentran relacionadas a este recurso, por lo cual la hidrografía también es un elemento a considerar en el modelo. Por otro lado, una vez revisada el área en estudio, se tiene que la fisiografía del lugar es bastante accidentada, por lo cual se decidió tomar en cuenta las características principales de este paisaje, como la elevación, la pendiente y la orientación de laderas, que en algún momento podrían dar respuesta a la pregunta de estudio.

Componente estadístico

División del área en estudio

El área en estudio se dividió usando una malla regular que se creó utilizando una técnica de cuadrantes, en el que el tamaño óptimo del cuadrante se puede calcular de la siguiente manera:

$$Tamaño\ del\ cuadrante\ = \frac{2 * A}{n}$$

en donde A es el área de la zona en estudio y n es el número de puntos en la distribución, por lo tanto el mejor tamaño de celda es $\sqrt{2 * A / n}$ (Lee, 2001). Esta fórmula se utilizó dentro del software ArcGIS usando la extensión *ET Geo-Wizard*, en la que se introduce la extensión total del área en estudio y el tamaño de cuadrante o celda deseado. La malla resulta de 14 por 12 celdas con un área de 38.44 y solo aquéllas que caen dentro del límite del área en estudio son consideradas para el análisis estadístico (Figura 4). El criterio para elegir qué celdas caen dentro del área de interés se basó en el porcentaje de cobertura de cada una y solo aquéllas con un 80% son consideradas resultando un total de 64, las cuales fueron cortadas con el polígono que comprende el límite del área en estudio.

Minería de datos

Una vez que las celdas elegidas se cortaron se obtiene el número de puntos de observación por cada una para obtener la frecuencia, generando una base de datos con 64 registros convirtiéndose en la variable dependiente para el análisis estadístico con el nombre de B_pts (Figura 5). Para obtener las variables independientes se sobrepone la malla de 64 celdas sobre cada una de las coberturas previamente procesadas (índice de verdor *Tasseled Cap*, índice de vegetación normalizado NDVI, elevación, pendiente, orientación de laderas, presencia de agua, localidades, vías de comunicación) en formato *raster*. Utilizando la opción *Zonal Statistics* (estadísticas zonales) de la extensión *Spatial Analyst* en ArcGIS se obtiene la media estadística de los valores que caen dentro de cada una de las 64 celdas guardando estos valores en la base de datos en su respectivo campo (X_green, X_ndvi, X_elev, X_slope, X_aspect, X_stream, X_town, X_road) repitiendo este proceso con cada una de las ocho coberturas (Figura 5).

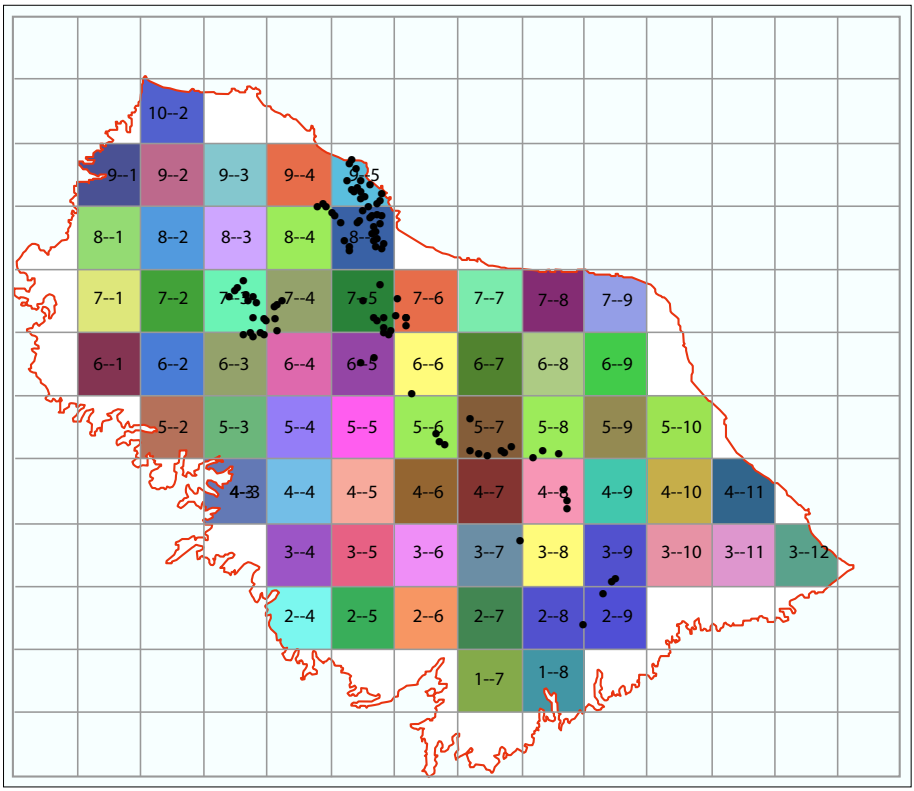


Figura 4. Malla de 64 celdas y los puntos de observación del género *Buteo*.

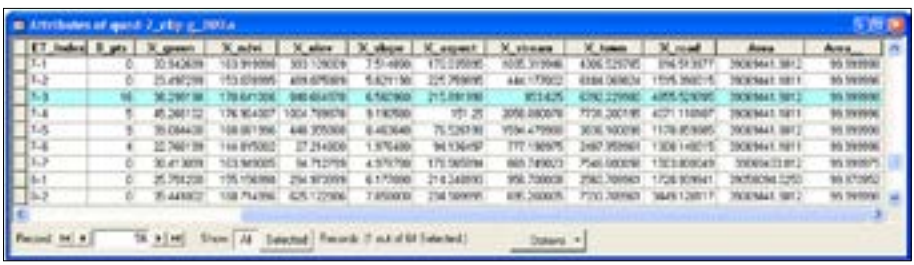


Figura 5. Base de datos con las variables dependientes e independientes.

Análisis

Con el fin de analizar los datos, la base de datos final con los 64 registros se importó al paquete estadístico SPSS. Aquí se llevaron a cabo diferentes pruebas estadísticas para llegar a conocer qué información es más relevante para explicar la presencia de las observaciones en el área en estudio, en otras palabras, para determinar por qué las aves rapaces del género *Buteo* se encuentran en cierto lugar y no en otros.

La mayoría de los problemas espaciales en el mundo real implican múltiples variables, y esto es particularmente cierto cuando se construye un modelo para entender por qué algo sucede en un lugar determinado y no en otro. El objetivo del análisis espacial es explicar el patrón de distribución de un evento y determinar en qué proporción una variable independiente interviene, una manera de abordar este tipo de eventos es utilizando un enfoque de regresión múltiple. Esta prueba estadística modela la media de la distribución de una variable dependiente, como una función de diversas variables independientes. En este estudio, ocho variables del paisaje son utilizadas para explicar las 148 observaciones del género *Buteo* y definir el grado de influencia de cada una.

Con el fin de aplicar un análisis de regresión múltiple, algunos supuestos se tomaron en cuenta: la relación entre la variable dependiente y cada variable independiente debe ser lineal o acercarse a ésta y cuantitativa; la distribución de cada variable debe ser normal o cercana con respecto a la línea de regresión; la varianza residual de la distribución no debe variar de los valores ajustados entre el máximo y el mínimo, y los residuos independientes, el valor de un error no se ve afectado por el valor de algún otro error. Para conocer la naturaleza del conjunto de datos e inferir los supuestos mencionados anteriormente, se realizaron estadísticas descriptivas, analizando las medidas de tendencia central y de dispersión de los datos para conocer la extensión y la forma de la información, sin embargo, deducir si las necesidades de adaptarse a una línea recta o un plano con n dimensiones es posible con cada variable; no es una tarea sencilla. En este caso, la estadística descriptiva ofrece un panorama general a través del paisaje que describe el estado de la distribución espacial de cada variable.

Si la distribución resultante no fuera la ideal de acuerdo con los supuestos pero si significativa, se podrá afirmar que la relación se asemeja a una línea y dar esta variable por buena para una estadística paramétrica procesando todas las variables con la *t (Student)* y *F (Fisher)*

Además de la estadística descriptiva, se llevó a cabo una matriz de correlación de *Pearson* que proporciona una visión del tipo de relación que existe entre

las variables, así como el grado de significancia entre ellas para poder complementar los supuestos establecidos.

Resultados y discusión

Estadística descriptiva

La estadística descriptiva para cada variable se calculó y se presenta en las siguientes dos tablas. La primera descripción es sobre la variable dependiente o puntos de observación (genero *Buteo*, Tabla 1), y la segunda se refiere a las variables independientes o explicativas (atributos, Tabla 2) con su respectiva interpretación.

Puntos de observación, variable dependiente

Estadísticas descriptivas

El rango es la diferencia entre los valores más pequeños y más grandes observados en una variable. Este valor se usa para determinar el número de clases en el histograma y se considera como una medida de la variabilidad.

La media (también llamada media aritmética o promedio) es la medida más apropiada de tendencia central al utilizar datos de intervalo o razón que en este caso resultó en 2.31 y nos dice donde se encuentra el promedio de la distribución de las frecuencias. El error estándar de la media es la desviación estándar hipotética de N y una medida de qué tanto varía el valor de la media de la distribución utilizada para comparar la media observada con su valor hipotético. En este caso,

Tabla 1. Estadísticas descriptivas para la variable dependiente

	N Statistic	Range Statistic	Minimum Statistic	Maximum Statistic	Sum Statistic	Mean		Std. Deviation Statistic	Variance Statistic	Skewness		Kurtosis	
						Statistic	Std Error			Statistic	Std Error	Statistic	Std Error
B_PTS	64	38	0	38	148	2.31	.76	6.10	37.266	4.164	.299	20.149	.590
Valid N (listwise)	64												

Fuente: SPSS, versión 11.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de las variables independientes

	N Statistic	Range Statistic	Minimum Statistic	Maximum Statistic	Sum Statistic	Mean		Std. Deviation Statistic	Variance Statistic	Skewness		Kurtosis	
						Statistic	Std Error			Statistic	Std Error	Statistic	Std Error
X_GREEN	64	45.1306	.7104	45.8410	1508.2116	23.5658	1.4301	11.4409	130.894	-.260	.299	-.799	.590
X_NDVI	64	104.0341	79.4477	183.4819	9828.9328	153.5770	2.2058	17.6471	311.419	-1.415	.299	3.851	.590
X_ELEV	64	1088.2251	27.2147	1115.4399	28858.6742	450.9167	33.2005	265.6041	70545.551	.733	.299	.117	.590
X_SLOPE	64	21.5093	.3966	21.9060	463.7524	7.2461	.4793	3.8348	14.706	1.668	.299	3.671	.590
X_ASPECT	64	207.2574	27.2525	234.5099	10708.3906	167.3186	5.8773	47.0184	2210.738	-.808	.299	.173	.590
X_STREAM	64	3168.1780	375.3519	3543.5300	52728.4107	823.8814	68.4822	547.8579	300148.258	2.936	.299	10.362	.590
X_ROAD	64	5413.6168	613.4530	6027.0698	117647.6013	1838.2437	152.5007	1220.0058	1488414.115	1.662	.299	2.265	.590
X_TOWN	64	12356.3996	1337.1999	13693.5996	386281.5106	6035.6486	433.1876	3465.5011	12009698.481	.673	.299	-.609	.590
Valid N (listwise)	64												

Fuente: SPSS, versión 11.

el error estándar es 0.76, lo que significa que no hay diferencia estadística entre la media observada y la teórica.

La desviación estándar σ (también llamada *sigma* cuando la población total se usa) representa una medida de dispersión donde es posible conocer el grado de propagación o variabilidad de la media, y entre los valores. Alternativamente, se pueden conocer qué tan fuerte están agrupados los valores. En este caso, la desviación estándar calculada fue de 6.10. Utilizando la media (2.31) y la desviación estándar (6.10) se obtiene el valor total de la dispersión de los valores sumando o restando la desviación estándar de la media por lo que la mayoría de los valores se encuentran dispersos entre -3.79 y 8.41. La varianza que es el cuadrado de la desviación estándar (σ^2), también indica el valor de la desviación que en este caso es de 37.266.

La asimetría (*skewness*) mide el grado de simetría de una distribución de frecuencias mediante la determinación de la amplitud en que los valores se distribuyen a cada lado de la media, así que el valor del sesgo puede ser positivo (a la izquierda de la media) o negativo (a la derecha de la media). En ambos casos (positivo o negativo) cuando los valores se acercan a cero se puede decir que la distribución es casi simétrica o ligeramente asimétrica. En general, un valor de asimetría mayor a uno indica una distribución que difiere significativamente de una distribución normal. Dado que muchas pruebas estadísticas asumen que los datos se distribuyen normalmente, este valor es útil para comprobar si es cierto o no. En este caso, la asimetría se sitúa en 4.164, por tanto el conjunto de datos no tiene una distribución normal.

La curtosis mide el grado de inclinación en una distribución de frecuencias con respecto a la distribución normal mediante la determinación de la forma de campana. La distribución puede ser leptocúrtica (pico), mesocúrtica (moderada) o platicúrtica (redondeada). Para una distribución normal, el coeficiente de curtosis es cero, mientras que cuando el coeficiente es mayor que cero la curva es muy empinada en el centro o tiene colas relativamente largas y cuando el coeficiente es menor que cero, la curva es plana con colas cortas. En este caso el valor de la curtosis es de 20.149; lo que significa que la distribución es leptocúrtica indicándonos que los datos se agrupan en su mayoría en dos clases impidiendo una distribución normal.

En la naturaleza las especies no cumplen con patrones de distribución homogéneos por razones aleatorias dictadas por el tipo de paisaje en el que se encuentren. El caso de estas aves de presa no es la excepción, ya que no hacen un uso extensivo del terreno de manera uniforme aun cuando parece que éste cumple con las descripciones de hábitat revisadas en la literatura. Desde que los

puntos de las observaciones son georreferenciados se puede inferir que no tienen una distribución homogénea dentro del área en estudio y esto es corroborado con las estadísticas obtenidas.

Coberturas: variables independientes

Las estadísticas expuestas en la Tabla 2 se describen siguiendo el mismo orden y las mismas definiciones explicadas anteriormente, de modo que solo se representará la interpretación de los resultados.

Índice de verdor, X_GREEN

Para la variable verdor la media fue de 23.56 y la desviación estándar de 11.44. Así pues, utilizando ambos resultados, se puede obtener la dispersión total de los valores alrededor de la media que en este caso es de entre 12.12 y 35.00, y esta amplia dispersión nos está diciendo que los valores están disgregados. La varianza fue 130.89. El error estándar de la media fue 1.4, lo que significa que no hay gran diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría fue -0.260 y la curtosis -0.799, esto quiere decir que la distribución de frecuencia es casi normal.

De acuerdo con estos números y la curva en forma de campana en la gráfica, la vegetación en este índice tiene una distribución homogénea en toda el área en estudio. Parece que las áreas abiertas y semi-abiertas, así como los parches remanentes de bosque y áreas de cultivo están distribuidos casi de manera proporcional. Si esta afirmación es cierta, entonces la distribución del género *Buteo* puede estar cerca de la normal (aun con la presencia de clústers) debido a que el uso del paisaje por estos animales puede ser igual en casi todas partes y no solo en ciertas áreas.

Una explicación posible es el hecho de que los datos obtenidos del índice de verdor Tasseled Cap fueron remuestreados del tamaño de píxel original al tamaño de la celda al obtener la media, lo cual pudo haber creado patrones de distribución de vegetación homogéneos y por este motivo no presenta una aparente relación espacial con nuestros puntos de observación.

Índice de vegetación normalizado, X_NDVI

Para la variable NDVI la media calculada fue de 153.57 y la desviación estándar de 17.64. Así pues, utilizando ambos resultados, se obtiene la dispersión total de los valores alrededor de la media que en este caso está entre 135.57 y 171.21, y esta estrecha dispersión nos dice que los valores están concentrados. La varianza

se localiza en 311.41. El error estándar de la media es de 2.2, lo que significa que no hay gran diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría se encuentra en -1.415 y la curtosis es de 3.851, lo que significa que la distribución de frecuencias es alejada de la distribución normal, en otras palabras, la curva tiene un sesgo negativo hacia la derecha mostrando una campana leptocúrtica por encima de la normal.

Esta variable parece más realista que el índice de verdor Tasseled Cap. Aunque el NDVI y el Tasseled Cap provienen de la misma imagen de satélite, el proceso matemático es completamente diferente para cada índice. En este caso la vegetación muestra una acumulación en la parte media de los valores y cuatro grupos independientes, diciéndonos que existen grupos bien definidos. Esta estadística concuerda con una simple descripción del paisaje con temas muy definidos como agua, bosque, pastizal y cultivos.

Aunque el mismo proceso de remuestreo del tamaño de píxel a celda se llevó a cabo, cada elemento del paisaje tiene una mejor definición, siendo más congruente con la descripción del área en estudio y con la literatura del género *Buteo*.

Elevación, X_ELEV

Para la variable de elevación la media calculada fue de 450.91 y la desviación estándar en 265.60, así que utilizando ambos resultados se obtiene la dispersión total de los valores alrededor de la media, que en este caso está entre 185.31 y 707.51, esta dispersión de valores es moderada. La varianza se localiza en 70545.55. El error estándar de la media es 33.20, significando que existe una gran diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría está en 0.733 y la curtosis en 0.117; lo que significa que la distribución de frecuencias es casi normal, en otras palabras, la curva tiene un sesgo positivo hacia la izquierda, mostrando una campana moderada o mesocúrtica.

Como se sabe, el área en estudio es una cadena montañosa con altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 1 720 m. Esta distribución altitudinal parece casi normal de acuerdo con las estadísticas, lo que significa que hay una elevación parcialmente homogénea en toda la zona derivada del remuestreo del modelo digital de elevación al tamaño de celda. Esta variable no es esencial en la distribución del género *Buteo* ya que acostumbran vivir desde el nivel del mar hasta los 1 800 m sobre éste de acuerdo con la literatura, pero tomando en cuenta la falta de normalidad en la distribución de los puntos observados esta variable podría ser una respuesta para la distribución que presentan por clúster.

Pendiente, X_SLOPE

Para la variable pendiente la media calculada fue 7.25 y la desviación estándar 3.83, utilizando ambos resultados se obtiene la dispersión total de los valores alrededor de la media, que en este caso está entre 3.42 y 11.08, y se sabe que esta dispersión de los valores es moderada. La varianza se localizó en 14.7. El error estándar de la media está en 0.48, lo que significa que no hay diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría está en -1.66 y la curtosis en 3.671; esto significa que la distribución de la frecuencia no es normal, en otras palabras, la curva tiene un ligero sesgo positivo a la izquierda mostrando un pico o campana leptocúrtica por encima de la normal.

La distribución de la pendiente va del cero hasta cañones de paredes escarpadas. Siguiendo las estadísticas descriptivas, no existe una distribución homogénea que represente la compleja orografía de la zona en estudio, lo cual se apega mucho a la realidad. Esta variable no es particularmente importante para la distribución del género *Buteo* porque el área que utilizan normalmente se encuentra en zonas planas y/o con ligeras pendientes, siendo éstas abiertas o semi-abiertas pero una vez más tomando en cuenta la anormal distribución de los puntos observados esta variable estadísticamente nos podría dar una respuesta.

Orientación de laderas, X_ASPECT

Para la variable orientación la media calculada fue de 167.31 y la desviación estándar de 47.02. Utilizando ambos resultados se obtiene la dispersión total de los valores alrededor de la media, que en este caso está entre 120.28 y 214.31, lo cual índica que la dispersión de los valores es moderada. La varianza se localiza en 2210.73. El error estándar de la media es de 5.88, lo que significa que no hay una gran diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría es de -0.808 y la curtosis es 0.173; lo que quiere decir que la distribución de frecuencia es casi normal; en otras palabras, la curva tiene un ligero sesgo negativo hacia la derecha, mostrando una campana moderada, por encima de la normal.

De los datos auxiliares derivados del modelo digital de elevación, la orientación de laderas puede ser la información más útil después del índice de vegetación normalizado. Mostrando una distribución casi normal, la orientación de las laderas quizá tenga un papel importante en la actividad del género *Buteo*, como la anidación. Usando el sol como una referencia, estas aves buscan prolongadas exposiciones a la luz y al calor, ya que son animales diurnos, así como la búsqueda de protección a los vientos predominantes.

Presencia de agua, X_STREAM

Para la variable de presencia de agua la media es de 823.9 y la desviación estándar de 547.86. Empleando ambos resultados, se obtiene la dispersión total de los valores alrededor de la media que en este caso está entre 276.04 y 1371.76, que es una dispersión concentrada. La varianza fue de 300148.25. El error estándar de la media fue de 68.48, lo que significa que hay una gran diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría fue 2.936 y la curtosis 10.362, lo que quiere decir que la distribución de la frecuencia es alejada de la normal; en otras palabras, la curva tiene un sesgo positivo hacia la izquierda mostrando un pico o campana leptocúrtica por encima de la normal.

Esta variable representa a los ríos y cuerpos de agua. Revisando los resultados es fácil ver que la distribución no es normal. Aunque el agua es esencial para cualquier forma de vida, el género *Buteo* no hace un amplio uso de ella. Prefieren pastizales y tierras de cultivo después de las cosechas, de acuerdo con la literatura, pero esto no implica que no necesiten de la presencia de ésta. Por el contrario, las especies que el género *Buteo* caza y la vegetación que usa para sus nidos, entre otras actividades, están íntimamente relacionados con el agua en esta región.

Localidades, X_TOWN

Para la variable de localidades la media fue calculada como 6035.6 y la desviación estándar fue 3465.50. Utilizando ambos resultados, se obtiene la dispersión total de los valores alrededor de la media que en este caso está entre 2570.1 y 9501.1, y esta amplia dispersión nos dice que los valores están disgregados. La varianza se localiza en 12009698.49. El error estándar de la media fue 433.19, significando que existe una enorme diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría fue 0.673 y la curtosis fue -0.609; esto significa que la distribución de la frecuencia es casi normal. Aunque, la curva tiene un ligero sesgo positivo a la izquierda, mostrando una campana moderada por debajo de normal.

La presencia humana es parte del paisaje en casi cualquier lugar y Los Tuxtlas no es la excepción. Las actividades antropogénicas en el área en estudio aparecen como manchas de diferentes tamaños y están bien distribuidas. Los números y la dispersión concuerdan con el mundo real mostrando una distribución casi normal a través del área. Estas actividades suelen crear presión sobre el paisaje en muchos aspectos como el uso de la madera, la caza o los vertederos. En este caso, una distribución normal de la presencia de localidades no representa una buena señal para el área, esto habla de una alteración a todo el medio natural, siendo una consideración de peso para obligar al género *Buteo* a hacer un uso limitado del paisaje aun cuando tienen conductas territoriales específicas.

Vías de comunicación, X_ROAD

Para la variable vías de comunicación la media fue calculada en 1 838.2 y la desviación estándar en 1 220.01, así que utilizando los dos resultados, se obtiene la dispersión de los valores alrededor de la media, que en este caso está entre 618.19 y 305.21, y esta estrecha dispersión nos indica que los valores están concentrados. La varianza se localiza en 1 488 414.11. El error estándar de la media fue 152.5, significando que existe una enorme diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría fue de 1.662 y la curtosis de 2.265; es decir, que la distribución de la frecuencia no fue normal. En otras palabras, la curva tiene un ligero sesgo positivo hacia la izquierda, mostrando una cima en la campana, por arriba de la normal.

Esta variable representa los caminos cubiertos por asfalto y caminos rurales. No importa qué forma describan los números o la densidad en el área, este tipo de infraestructura siempre crea una fragmentación en el paisaje. A primera vista, probablemente no es importante para las aves porque vuelan, pero en realidad la contaminación generada por las carreteras *per se*, representa un alto riesgo. De acuerdo con la revisión de la literatura, las aves son extremadamente sensibles a los cambios en el hábitat producidos por las actividades antropogénicas y tienen un papel importante como indicador ambiental.

En resumen, solo cuatro de las ocho variables explicativas tiene una distribución normal (índice de verdor Tasseled Cap, elevación, orientación de laderas y localidades), las otras cuatro variables, en general, muestran un sesgo positivo con una curtosis en pico. De las ocho variables independientes, solo la pendiente mostró cero en el error estándar de la media. El índice de verdor, el índice de vegetación NDVI y la orientación de laderas mostraron un error estándar de la media alto, mientras que las otras cuatro mostraron un error estándar muy alto. La clasificación arbitraria utilizada en la desviación estándar de disgregado a concentrado trata de explicar cómo los valores se encuentran dispersos alrededor de la media usando el mínimo y máximo como parámetros para interpretar esta clasificación.

El peso biológico de cada variable en la vida del género *Buteo* es más que una simple descripción estadística la cual podría estar influenciada por el método de cuadrantes empleado, la falta de observaciones de este género y/o el tamaño del área en estudio. Hablando en términos *espaciales*, que es la interpretación que finalmente se debe hacer, no siempre existe una relación directa con la distribución de algo en el espacio. Ese es un enfoque más bien teórico, y en el mundo real los fenómenos no se presentan así. El querer forzar estadísticamente los datos no es necesariamente una representación de éstos en un modelo, aun cuando éste

sea una abstracción de la realidad, como en este estudio, donde las aves rapaces no se representan de forma homogénea. En este caso se debe a la representación puntual de las aves, que en la realidad son polígonos, así como sus territorios o áreas de influencia, y que esa representación podría ofrecer una mejor solución en el espacio. En el caso de las variables independientes sucede algo similar, no son píxeles únicos o un conjunto de ellos encasillados en una categoría estadísticamente de forma perfecta en el espacio para facilitar un análisis, hablar de análisis espacial con datos duros es algo incompleto ya que en ningún momento se toman en cuenta las relaciones espaciales, en donde el dominio del espacio, de la topología y de los eventos son considerados por lo que se dará continuidad a los análisis siguiendo muy de cerca la literatura del género *Buteo*.

Correlación entre variables

La Tabla 3 muestra los coeficientes de correlación de *Pearson*, donde se asume que los datos se aproximan a una distribución normal. El coeficiente de correlación de *Pearson* es una medida de asociación lineal entre dos variables en las que los valores de los coeficientes varían de 1 a -1, y el signo del coeficiente indica la dirección de la relación (positiva o negativa). El valor absoluto del coeficiente de la correlación indica la fuerza; un valor absoluto alto indica una relación más fuerte (cercano a 1 en cualquier dirección), mientras valores absolutos medio indican una relación pobre, como por ejemplo 0.480. Siguiendo este razonamiento, los coeficientes de correlación con bajos valores absolutos (tales como cero o -0.011) indican relaciones débiles o nulas. Los coeficientes de correlación en la diagonal principal siempre son 1.0, ya que cada variable tiene una relación positiva lineal con ella misma.

El nivel de significación (o valor p) es la probabilidad de obtener resultados tan extremos como el observado. Si el nivel de significación es muy pequeño (menos de 0.05) la correlación es significativa y las dos variables son linealmente dependientes. De manera alternativa, si el nivel de significación es relativamente alto (por ejemplo, 0.50) la correlación no es significativa y las dos variables no son linealmente dependientes.

El primer análisis de la matriz de correlación es la relación entre la variable dependiente y las variables independientes o explicativas. En este caso, ningún coeficiente de correlación de Pearson resultó mayor que 0.289, por lo tanto, todos los valores oscilan entre relaciones pobres y débiles. De las ocho variables explicativas, cinco tienen relaciones pobres o valores absolutos medios (índice de verdor,

Tabla 3. Coeficientes de Correlación de Pearson

Correlaciones N=64

		B_PTS	X_GREEN	X_NDVI	X_ELEV	X_SLOPE	X_ASPECT	X_STREAM	X_ROAD	X_TOWN
B_PTS	Pearson Correlation	1.000	.239	.192	-.017	.100	-.222	.289	.046	.236
	Sig. (2-tailed)	.	.058	.130	.895	.433	.077	.020	.721	.060
X_GREEN	Pearson Correlation	.239	1.000	.907	.480	.549	-.041	.091	.469	.440
	Sig. (2-tailed)	.058	.	.000	.000	.000	.747	.474	.000	.000
X_NDVI	Pearson Correlation	.192	.907	1.000	.446	.636	.141	-.251	.440	.476
	Sig. (2-tailed)	.130	.000	.	.000	.000	.267	.045	.000	.000
X_ELEV	Pearson Correlation	-.017	.480	.446	1.000	.554	.212	.019	.600	.295
	Sig. (2-tailed)	.895	.000	.000	.	.000	.093	.879	.000	.018
X_SLOPE	Pearson Correlation	.100	.549	.636	.554	1.000	.080	-.160	.582	.609
	Sig. (2-tailed)	.433	.000	.000	.000	.	.530	.207	.000	.000
X_ASPECT	Pearson Correlation	-.222	-.041	.141	.212	.080	1.000	-.462	-.117	-.257
	Sig. (2-tailed)	.077	.747	.267	.093	.530	.	.000	.359	.040
X_STREAM	Pearson Correlation	.289	.091	-.251	.019	-.160	-.462	1.000	-.011	-.132
	Sig. (2-tailed)	.020	.474	.045	.879	.207	.000	.	.930	.300
X_ROAD	Pearson Correlation	.046	.469	.440	.600	.582	-.117	-.011	1.000	.568
	Sig. (2-tailed)	.721	.000	.000	.000	.000	.359	.930	.	.000
X_TOWN	Pearson Correlation	.236	.440	.476	.295	.609	-.257	-.132	.568	1.000
	Sig. (2-tailed)	.060	.000	.000	.018	.000	.040	.300	.000	.

* La correlación es significativa en el nivel 0.05 (2 colas).
** La correlación es significativa en el nivel 0.01 (2 colas).

Fuente: SPSS, versión 11.

índice de vegetación NDVI, orientación de laderas, localidades y presencia de agua), las otras tres tienen relaciones débiles o valores absolutos bajos (elevación, pendiente y vías de comunicación). En casi todos los casos la relación es positiva, únicamente la orientación de laderas tiene una relación negativa.

El nivel de significación en este primer análisis muestra que solo una variable explicativa (presencia de agua) tiene una relación lineal significativa con la variable dependiente, las otras siete variables no la tienen. En este caso, la variable agua muestra un nivel de significación de 0.020, indicando que los ríos, cuerpos de agua y los puntos del género *Buteo* están significativamente correlacionados de manera positiva; esto es, cuanto más aumenta la distancia al agua, más aumentan los puntos de observación. Casi en la misma situación que la presencia de agua, las variables explicativas índice de verdor Tasseled Cap, orientación de laderas y localidades, con niveles de significación 0.058, 0.070 y 0.060, respectivamente, muestran una relación lineal con los puntos del género *Buteo*, pero en estos casos, los valores no son significativos. Las otras cuatro variables independientes muestran niveles de significación que oscilan entre 0.130 (índice de vegetación NDVI) a 0.895 (elevación) indicando que la relación con la variable dependiente no es lineal dependiente.

El segundo análisis en la matriz de correlación es la relación entre variables independientes. En este caso se tienen 28 diferentes coeficientes de correlación de Pearson, donde solo un coeficiente muestra una relación lineal casi perfecta (índice de verdor-índice de vegetación NDVI), 14 con relaciones pobres o valores absolutos medios, y 13 con relaciones débiles o valores absolutos bajos, de las cuales tres muestran relaciones casi nulas.

Analizando el coeficiente índice de verdor-índice de vegetación NDVI que es cercano a uno (0.907), vemos que ambos conjuntos de datos contienen casi la misma información. Esto se debe a que estas dos variables se refieren a un índice de vegetación generado de la misma imagen de satélite, por lo que parece normal encontrar valores similares en ambas variables.

Los 14 coeficientes que muestran relaciones pobres similares o valores absolutos medios, se relacionan con el modelo digital de elevación (MDE) y con las actividades antropogénicas en el área en estudio. Únicamente la orientación de laderas, que es un dato secundario del MDE, no cae en la categoría de relaciones pobres, sino en la de relaciones débiles o de bajos valores absolutos. Esta variable, orientación de laderas, contiene información de forma radial (de 1 a 360 grados), así que tal vez estos valores son algo confusos para ser interpretados por el sistema.

De los 13 coeficientes que muestran relaciones débiles, diez están relacionados con la orientación de laderas, presencia de agua, y algunas a la variable loca-

lidades. Tal vez la razón de está débil relación se debe a la forma en que los datos se crearon; la orientación de laderas en forma radial, para los cuerpos de agua y localidades el cálculo de la distancia lineal del rasgo hacia afuera. Extrañamente, la variable vías de comunicación que es parte del paisaje antrópico no muestra el mismo comportamiento que la presencia de agua y las localidades, aunque se calculó de la misma manera (distancia lineal desde los rasgos). Tal vez el número de rasgos involucrados en la generación de las distancias; el número de caminos es menor al de las localidades o de la presencia de agua.

Los otros tres coeficientes que mostraron relaciones casi nulas en sus valores fueron entre orientación de laderas-índice de verdor, presencia de agua-elevación y presencia de agua-vías de comunicación. En estos tres casos, una variable pertenece al MDE o al conjunto de datos de localidades y vías de comunicación, y el origen de estos valores puede influir en el coeficiente de *Pearson*.

El nivel de significación en este segundo análisis muestra que 18 de 28 coeficientes tienen una relación lineal, lo que nos dice que cuando una variable aumenta, la otra también lo hace. En otras palabras, están linealmente relacionadas. A partir de estos 18 valores significativos, 16 tienen cero y las otras dos tienen 0.018, 0.040 y 0.045. Los diez coeficientes que no caen dentro del nivel de significación muestran valores altos, que nos dice que tal vez la relación entre estas variables no es lineal o que no hay tal relación. Las variables que mejor se ajustan al nivel de significación son índice de vegetación NDVI y localidades, mientras las variables que peor se ajustan son orientación de laderas y presencia de agua. Las otras cuatro variables explicativas se ajustan al nivel de significación pero solo un 70% con respecto a las otras variables.

Como descripción general de la matriz de correlación, todas las variables muestran una relación pobre con un excelente nivel de significación. Excluyendo el coeficiente de *Pearson* de índice de verdor-índice de vegetación NDVI, el resto de la tabla parece útil para el análisis estadístico, porque en términos generales, esta matriz nos dice que la información contenida en cada variable es diferente con respecto a las otras variables.

Regresiones múltiples

El análisis de regresión es una estimación de la relación lineal entre la variable dependiente y una o más variables independientes. En este estudio varias regresiones lineales múltiples fueron conducidas al mismo conjunto de datos con el fin de llegar a un nivel de significación requerido, usando el valor *t* como un parámetro

para alcanzar un 95% de nivel de confianza. La primera regresión se realizó con las ocho variables explicativas como se puede ver en la Tabla 4. Utilizando esta tabla como punto de partida, el proceso de eliminación de las variables independientes comienza con el valor *t* más bajo.

El proceso de eliminación de variables desde la primera regresión hasta la última regresión fue en el siguiente orden:

1. Orientación de laderas.
2. Elevación.
3. Vías de comunicación.
4. Pendiente.
5. Localidades.
6. Índice de verdor Tasseled Cap.

Para llegar a la regresión final con 95% de nivel de confianza con las variables índice de vegetación NDVI y presencia de agua, como se muestra en la Tabla 5.

Biológicamente hablando, las dos variables resultantes son esenciales para la vida, no hay vegetación sin agua, y *viceversa*, además, la presencia o ausencia de

Tabla 4. Primera regresión

Coeficientes

Model B		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		Std. Error	Beta			
1	(Constant)	-49.933	21.638		-2.308	.025
	X_GREEN	-.398	.248	-.746	-1.605	.114
	X_NDVI	.365	.170	1.056	2.146	.036
	X_ELEV	-2.131E-03	.004	-.093	-.541	.591
	X_SLOPE	-.223	.304	-.140	-.733	.467
	X_ASPECT	-8.499E-04	.020	-.007	-.042	.967
	X_STREAM	7.124E-03	.002	.639	3.135	.003
	X_ROAD	-5.300E-04	.001	-.106	-.610	.545
	X_TOWN	5.593E-04	.000	.317	1.827	.073

a Variable dependiente: B_PTS

Fuente: SPSS, versión 11.

Tabla 5. Regresión final

Coeficientes

Model B		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		Std. Error	Beta			
1	(Constant)	-15.972	6.850		-2.332	.023
	X_NDVI	9.753E-02	.042	.282	2.323	.024
	X_STREAM	4.013E-03	.001	.360	2.968	.004

a Variable dependiente: B_PTS

Fuente: SPSS, versión 11.

animales está determinado por esas dos variables. El género *Buteo* muestra una fuerte relación con el índice de vegetación NDVI, siendo éste previsible ya que las estadísticas descriptivas muestran una buena descripción del paisaje, además de la explicación en la revisión bibliográfica. La segunda variable se presenta como una gran sorpresa, con una mejor significación que la vegetación; los números mostrados por las estadísticas descriptivas y el histograma no revelaron el valor real de la presencia de agua para este género.

De acuerdo con la revisión de la literatura del género *Buteo*, el uso de la vegetación es extremadamente importante, más específicamente los bordes del bosque. El resultado obtenido de la regresión con el 95% de confianza, corrobora la historia de vida de estos animales. Una posible explicación para entender la presencia de agua dentro del 95% de confianza puede ser el gran lago en medio del área en estudio y la metodología de cuadrantes usada que hace que ésta resultara una buena variable para explicar los puntos del género *Buteo*. Como se mencionó antes, para obtener los cuadrantes se promedió un cierto número de píxeles, en esta etapa de "cambio de tamaño" el elemento agua se incorporó a aquellas celdas donde solamente una pequeña proporción estaba dentro de la celda, dando la impresión de que el elemento agua es más grande que el real.

El mismo procedimiento fue utilizado en un nuevo conjunto de regresiones con el fin de excluir la variable índice de verdor, debido a las semejanzas descritas en el análisis de correlación entre estas dos variables, y teniendo en cuenta que la variable índice de vegetación NDVI surge de la primera serie de regresiones.

En esta segunda ronda de regresiones, siete variables explicativas se utilizaron como punto de partida (Tabla 6) y se inició el proceso de eliminación.

Esta vez el proceso de eliminación fue:

Tabla 6. Primera regresión del segundo set

Coeficientes

Model B		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		Std. Error	Beta			
1	(Constant)	-17.966	8.586		-2.092	.041
	X_NDVI	.106	.055	.307	1.930	.059
	X_ELEV	-3.205E-03	.004	-.139	-.814	.419
	X_SLOPE	-9.678E-02	.298	-.061	-.324	.747
	X_ASPECT	2.403E-03	.021	.019	.117	.908
	X_STREAM	4.529E-03	.002	.406	2.796	.007
	X_ROAD	-6.818E-04	.001	-.136	-.778	.440
	X_TOWN	5.350E-04	.000	.304	1.726	.090

a Variable dependiente: B_PTS

Fuente: SPSS, versión 11.

1. Orientación de laderas.
2. Pendiente.
3. Vías de comunicación.
4. Localidades.
5. Elevación.

Los resultados en la regresión final al 95% de nivel de confianza son las variables índice de vegetación NDVI y presencia de agua que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Regresión final del segundo set

Coeficientes

Model B		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		Std. Error	Beta			
1	(Constant)	-15.972	6.850		-2.332	.023
	X_NDVI	9.753E-02	.042	.282	2.323	.024
	X_STREAM	4.013E-03	.001	.360	2.968	.004

a Variable dependiente: B_PTS

Fuente: SPSS, versión 11.

Como se puede ver, las regresiones finales con y sin índice de verdor tienen el mejor nivel de significación conteniendo las mismas variables explicativas.

El hecho de que las mismas variables con los mismos niveles de confianza se obtuvieran en los dos conjuntos de regresiones indica que el índice de verdor no explica la presencia del género *Buteo* en el área en estudio. Como se mencionó anteriormente, las estadísticas descriptivas de la variable índice de verdor no muestran una representación del mundo real.

Ambos conjuntos de regresiones, con y sin índice de verdor, resultan con dos variables en ambos casos, índice de vegetación NDVI y presencia de agua, que son las variables que mejor explican las observaciones del género *Buteo*. Aunque el proceso de eliminación se realizó en orden diferente en cada regresión, la vegetación y las fuentes de agua aclaran la relación entre estos animales y el paisaje, lo cual se intentará comprobar utilizando *dummies* en un nuevo conjunto de regresiones.

Interpretación estadística

El coeficiente de determinación (R^2) es una medida de bondad para ajustar un modelo lineal, también llamada R cuadrada. Es la proporción de la variación de la variable dependiente explicada por el modelo de regresión, que oscila en su valor, de 0 a 1. Los valores pequeños indican que el modelo no se ajusta bien a los datos. En esta caso, la R^2 es 0.158 (Tabla 8), que indica que el 15.8% de la variación de la variable dependiente en el modelo puede ser explicada por las variables independientes. La variación en la variable dependiente que no se puede explicar por las variables independientes se conoce como la suma de cuadrados residual (Tabla 9), que en este caso es de 1 976.325.

La R cuadrada ajustada intenta corregir R^2 para reflejar mejor la bondad de ajuste del modelo. Es este caso la R cuadrada ajustada es 0.131, que solo explica el 13.1% de la variación.

Tabla 8. Coeficiente de determinación

Resumen del modelo

Model l	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.398	.158	.131	5.69

a Predictores: (constante), X_STREAM, X_NDVI.
b Variable dependiente: B_PTS.

Fuente: SPSS, versión 11.

Tabla 9. Análisis de Varianza ANOVA

ANOVA

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	371.425	2	185.712	5.732	.005
	Residual	1976.325	61	32.399		
	Total	2347.750	63			

a Predictores: (constante), X_STREAM, X_NDVI.
b Variable dependiente: B_PTS.

Fuente: SPSS, versión 11.

En general, el propósito del análisis de varianza (ANOVA) se basa en F, que mide si un conjunto de variables contribuye significativamente a la varianza de una respuesta. La Tabla 9 de ANOVA crea un análisis estándar de varianza. Si el nivel de significación de la estadística F es menor a 0.05, entonces las variables independientes hacen un buen trabajo explicando la variación de la variable dependiente, pero si esta significación es mayor a 0.05, entonces las variables independientes no explican la variación de la variable dependiente. Por tanto se concluye en este conjunto de regresiones que nuestras variables independientes le dan una explicación a la variable dependiente de manera aceptable, con un valor de 0.005.

Dummies

De acuerdo con la literatura, el género *Buteo* utiliza los bordes del bosque donde los espacios abiertos comienzan. Estas aves rapaces usan las ramas superiores de los árboles para anidar cerca de los bordes de los bosques y es en los campos de cultivo y pastizales donde cazan y se alimentan. Con el fin de probar el modelo de regresión y siguiendo la literatura, se creó un conjunto de dummies utilizando el histograma del índice de vegetación NDVI (Figura 6). Para establecer los límites entre los bosques y los espacios abiertos se crearon dos dummies binarios diferentes, el primero denominado *a*, se generó utilizando el bosque/límites de espacios abiertos con el código binario 1 y el resto de los valores del histograma con el código 0. El segundo dummy, llamado *b*, se generó al contrario, bosque/límites de espacios abiertos con el código binario 0 y el resto de los valores del histograma con el código 1. Los límites del bosque/espacios abiertos se establecieron con los valores de píxel 156 al 172. Haciendo uso de esta regla de decisión, todos los puntos de observación que caen en el rango de los bordes para el dummy *a* tienen

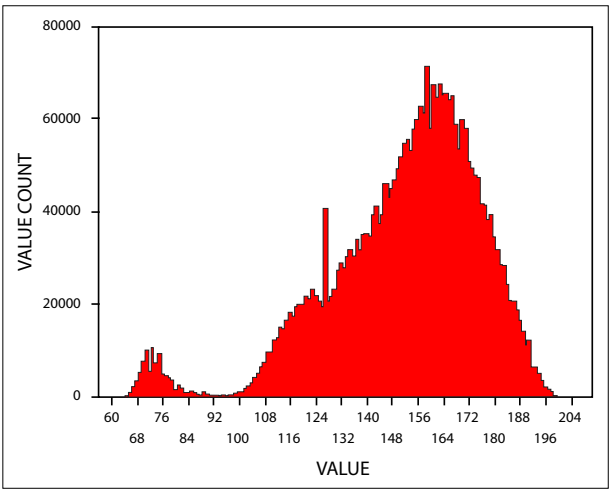


Figura 6. Valores para generar los dummies.

1 y todos aquellos puntos de observación que caen fuera del rango tienen 0. Por el contrario, para el dummy *b*, aquellas observaciones que caen dentro del rango tienen 0 y las que caen fuera tienen 1.

Una vez que se crearon los dummies, se usaron cuatro regresiones con el fin de probar el modelo. Estos dummies se multiplicaron por la variable del NDVI en cada regresión. La primera y segunda regresiones se probaron usando el dummy *a*, donde la variable verdor está presente en el primer modelo y ausente en el segundo. De la misma manera, pero utilizando el dummy *b*, la tercera y cuarta regresiones se probaron usando la ausencia/presencia del verdor, respectivamente. Como se describió en la metodología de la regresión lineal, las variables se eliminaron una a una usando el valor-*t* hasta que el nivel de significación alcanzó el 95% de confianza.

Dummy a

Después de seguir la metodología descrita anteriormente, ambos modelos, con y sin verdor, las regresiones lineales resultaron con solo dos variables explicativas, cuerpos de agua y asentamientos. Cada variable fue eliminada una por una en diferente orden en cada modelo, pero obteniendo los mismos resultados que se muestran en la Tabla 10.

Dummy b

Una vez más, siguiendo la misma metodología, se encontró que las pruebas donde se utilizó el dummy *b* eran idénticas. En ambos casos, las variables independien-

Tabla 10. Regresión con dummy *a*

Coeficientes

Model B		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		Std. Error	Beta			
1	(Constant)	-3.649	1.905		-1.916	.060
	X_STREAM	3.634E-03	.001	.326	2.755	.008
	X_TOWN	4.917E-04	.000	.279	2.359	.022

a Variable dependiente: B_PTS

Fuente: SPSS, versión 11.

tes se eliminaron una por una hasta llegar al 95% de nivel de confianza en los valores de significación, como en el dummy *a*. Ambos resultados de los dummies de regresión, con y sin verdor, resultaron con cuerpos de agua y asentamientos como las variables que explican las observaciones dependientes.

Acorde a los resultados de las regresiones hechas incorporando los dummies antes descritos, la vegetación representada por la cobertura del índice de vegetación NDVI no resulta ser significativa de acuerdo con el 95% de nivel de confianza con el que se corrió el modelo. Una explicación estadística puede ser la fragilidad del modelo en cuanto a la metodología en la preparación de las variables independientes ya que el origen de la información y el procedimiento en el cálculo de las distancias a los rasgos en cada tema pudo no haber sido el adecuado para todas las variables. Es probable que como la vegetación fue obtenida de manera directa de la imagen del satélite mediante el cálculo de un índice, mientras que las coberturas utilizadas de agua y localidades eran de origen vectorial a las cuales se les hizo un proceso de generar áreas de influencia para obtener las distancias y se procedió a rasterizar, y aunado al proceso de remuestreo para obtener los valores de las celdas, el procesamiento de los datos durante la regresión no mostró coherencia. Desde el punto de vista biológico, para las especies del género *Buteo* la vegetación es la base de su hábitat pero no necesariamente le dan el uso que la literatura describe, este argumento aparentemente incoherente puede estar bien representado en nuestro modelo con el uso de puntos en el espacio, es decir, las aves no son estáticas, hacen un uso del paisaje bastante extenso y no se pueden representar de forma puntual, se debió analizar un área de influencia para cada uno de los puntos de observación, para transformar de punto a polígono y enton-

ces utilizar estas áreas para someterlas al mismo procesamiento de remuestreo en vez de haber mantenido a esta variable dependiente como frecuencia de puntos.

Conclusiones finales

En este proyecto varias regresiones múltiples se emplearon para seleccionar el conjunto óptimo de variables explicativas, es decir, el número máximo para explicar tanto la distribución de las aves observadas como sea posible. El enfoque inicial era a través de regresiones múltiples (sin dummies) como estimador de la relación lineal entre la variable dependiente y las variables independientes, pero con el fin de "probar" los resultados de las regresiones se creó un dummy de datos usando la vegetación y siguiendo el énfasis de ésta en la literatura para demostrar su importancia, resultado que no se obtuvo por la metodología empleada.

Los resultados de las diferentes regresiones múltiples sugieren que la vegetación y el agua son críticos para la distribución de *Buteo*. En el mundo real ambas variables explicativas, vegetación y agua, son elementos básicos para la supervivencia. Los resultados del análisis de regresión tienen sentido debido a que diferentes tipos de vegetación son utilizados por esta ave rapaz para anidar y cazar, y las fuentes de agua son esenciales para cualquier organismo vivo. De acuerdo con la literatura, la vegetación es el principal factor en la distribución de las aves. Éstas dependen de los diferentes tipos de vegetación, utilizándola de varias formas. Por lo tanto, el dummy fue generado usando bosque y pastizales.

Los resultados de las diferentes regresiones usando los dummies de vegetación, sugieren que los ríos y los asentamientos son estadísticamente importantes para la distribución del género *Buteo* en este modelo. Dando por buenos estos resultados, la interpretación que se tendría es que estas aves le dan un uso bastante extenso a las áreas urbanas, aprovechando los recursos que estos lugares les brindan como alimento, refugio y anidación. En este caso, los asentamientos representan las actividades antropogénicas en el área en estudio. Una posible explicación para esta variable independiente puede ser la presencia de alimento como pequeños roedores que son fáciles de encontrar en mercados abiertos y tiraderos de basura. Otra posible explicación es el hecho de que las aves rapaces usan las esquinas de los techos altos, tales como iglesias, para refugiarse de las inclemencias del clima, y postes altos de energía eléctrica o similares para anidar durante la temporada de reproducción. Esta explicación también obedece a las presiones a las que el ser humano ha sometido al medio ambiente como deforestación, el uso

indiscriminado de pesticidas en las áreas de cultivo, lo cual obliga a estas aves a adaptarse a entornos urbanos

Los patrones de vegetación derivados de la percepción remota se pueden combinar con información del modelo digital del terreno para modelar la distribución de *Buteo*. Las relaciones entre estos animales y el paisaje pueden ser engañosas y difíciles de interpretar estadísticamente. Aunque la estructura de los modelos de regresión de distribución de las aves fue probada con dummies donde solo el agua fue constante, quedan muchas preguntas. En particular, se necesita tener en cuenta la sensibilidad de los modelos a las características de los datos usados en este proyecto, y tal vez la relación entre las aves rapaces y el paisaje no es lineal.

La aplicación de análisis de regresión a la evaluación de la distribución de los hábitats ofrece una técnica analítica rápida. Esta técnica proporciona los fundamentos para comprender los conjuntos de datos y proponer un futuro análisis con el fin de completar una visión global de la investigación en cuestión, posiblemente proponiendo modelos no lineales o de evaluación multicriteria. Aunque los datos derivados del análisis de regresión pueden no coincidir a clasificaciones existentes de hábitats o información ecológica, la explicación derivada de la interpretación puede ser usada para crear nuevas metodologías y aplicaciones en las que se incorpore con mayor peso el efecto de la distribución espacial y sus relaciones en la modelación y predicción de variables. Estos nuevos enfoques se pueden incorporar del trabajo de campo a la explicación final.

Capítulo 6. Aplicación del software FROG_V2 en el análisis fractal del espacio geográfico

Jean-François Parrot
Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Este capítulo enfatiza la aplicación de novedosas herramientas que se integraron en el software FROG (*Fractal Researches On Geosciences*, Parrot, 2009b, 2012). Dicho software en su primera y segunda versión más reciente (FROG_V2), fue diseñado para estimar la dimensión fractal en sus diversos aspectos. En el cuadro de estudios realizados entre 2000 y 2010 para el laboratorio LAFSINA del departamento de edafología del Instituto de Geología de la UNAM (Miranda *et al*., 2006; Oleschko *et al*., 2004; Oleschko *et al*., 2008; Torres *et al*., 2010; Vásquez *et al*., 2010), se desarrollaron numerosos módulos ejecutables en el ambiente *MsDos* con el fin de responder a la problemática de esta entidad.

Con la experiencia de observar y explicar a los usuarios cómo se utilizaba cada uno de estos módulos, además del tiempo requerido para obtener los resultados, era más interesante, amigable y rápido para los usuarios disponer de un software en el ambiente *Windows*, en el cual se pudieran encontrar diferentes acercamientos para estimar la medida de la dimensión fractal en las imágenes binarias o en tonos de gris. Por tal motivo se realizó la primera versión del software (FROG_V1)[7] y que se puede bajar de manera libre desde el sitio *web* del Instituto de Geografía de la UNAM. Posteriormente, los usuarios hicieron varias observaciones, peticiones y sugerencias, lo que condujo a desarrollar la segunda versión del software *FROG_V2*, el cual no solamente propone medir la dimensión fractal a partir de un conjunto de píxeles (imágenes binarias o en tonos de gris) como en la primera versión, sino además permite caracterizar estos conjuntos utilizando los métodos de Reconocimiento de Patrones y la Morfología Matemática.

[7] Registrada en 2009 en el Instituto Nacional de Derecho de Autor (INDAUTOR).

Se da un ejemplo sobre los diferentes acercamientos que propone el software *FROG_V2* para caracterizar un espacio geográfico tomando en cuenta sus dimensiones espaciales, la evolución de su forma en el tiempo, su textura y estructura. Se presentan diversos aspectos; algunos se refieren a aspectos teóricos sobre la dimensión fractal, el Reconocimiento de Patrones y la Morfología Matemática; otros se enfocan en la problemática de la extracción de las estructuras, en este caso estructuras urbanas, extraídas de las imágenes de satélite. Por último, se muestran varios tipos de tratamientos tomando en cuenta las diversas funciones del software.

Antecedentes teóricos

La dimensión fractal y sus medidas

Los conceptos fundamentales de la "geometría fractal" (Mandelbrot, 1983) ofrecen una solución intermedia entre el orden geométrico de Euclides y la geometría del caos; así se puede describir la rugosidad de los fenómenos naturales y medir de manera cuantitativa los patrones fragmentados e irregulares que existen en el Universo (Anderson *et al.*, 1996; Mandelbrot, 1983; Mandelbrot, 2002).

El rasgo más distintivo de los "fractales" es que a pesar de las irregularidades estadísticas que muestra ordinariamente una forma, se presenta un patrón regular. Dichas formas son generalmente invariantes a cambio de escala, es decir, que el grado de sus irregularidades o de su fragmentación es idéntico en todas las escalas de observación. El concepto central de la geometría fractal es la "dimensión fractal" (Falconer, 1995; Mandelbrot, 1983). Los "fractales" pueden encontrarse en cualquier espacio euclidiano uni, bi, tri o *n*dimensional, pero en relación con su rugosidad no pueden llenar todo el espacio en el cual se localizan. De tal manera que la dimensión fractal corresponde a un valor fraccionario y es un parámetro cuantitativo que describe el grado de ocupación del espacio por el conjunto fractal estudiado (Addison, 1997; Pentland, 1984).

En 1998 Anderson *et al.* propusieron una definición sencilla del objeto fractal auto-similar, mostrando que los aumentos de una imagen corresponden a copias (exactas o estadísticas) a diversas escalas del objeto. Así, un objeto fractal posee una simetría de dilatación a través de las escalas: cada pequeña parte del objeto es una réplica del todo.

La construcción de un objeto fractal se obtiene por repetición de un motivo en el espacio bi o tri-dimensional. Es un objeto geométrico con invarianza de escala, es decir, que cada porción puede ser considerada como una imagen a escala

reducida del completo (Figura 1). Por ejemplo en el espacio urbano se puede registrar la repetición de un mismo motivo. Este motivo depende y traduce el nivel tecnológico y/o cultural de una civilización dada (véase por ejemplo Teotihuacan; Oleschko *et al*., 2000).

La repetición del motivo puede ser isotrópica o anisotrópica. Cuando un objeto se escala de forma isotrópica se nota que existe una misma proporción en dos direcciones perpendiculares entre sí. Se dice que se trata de un fractal estadísticamente auto-similar. Por ejemplo, para una curva en un plano de coordenadas *x,y* la invarianza de escala se obtiene cuando se reduce o aumenta la escala por un mismo factor en ambas direcciones.

$$x \rightarrow \gamma x \;\; \text{y} \;\; y \rightarrow \gamma x$$

La dimensión fractal D es una cantidad estadística que indica como un objeto fractal auto-similar ocupa una porción del espacio euclidiano, corresponde a valores decimales entre 0 y 3 (1 para la línea, 2 para una superficie y 3 para un volumen) y no puede ser igual a 1, 2 o 3.

Uno de los métodos que permite calcular esta dimensión es el *conteo de cajas* (*Box Counting*), que consiste en cubrir el objeto con cajas (cuadradas para dos dimensiones) de longitud *L*.

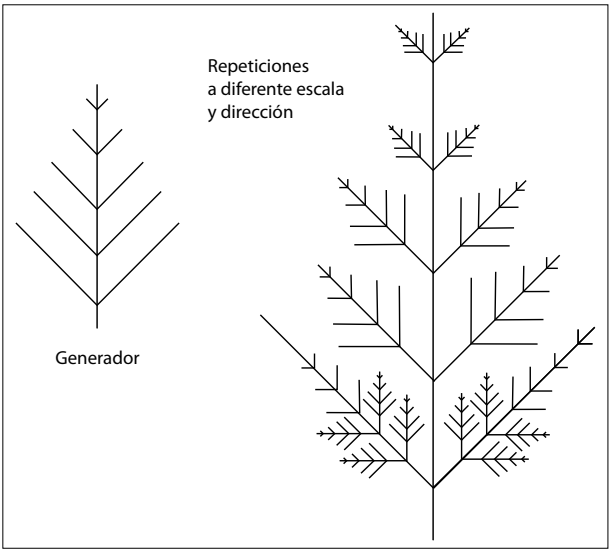


Figura 1. Objeto fractal y su generador.

$$D = \lim_{L \to 0} \frac{\log(N(L))}{\log(L)}$$

donde *N(L)* es el número necesario de cajas para cubrir el objeto. *D* corresponde al inverso de la pendiente de la línea recta ajustada a la gráfica *log(N(L)* vs *log(L)*, (Figura 2).

Los objetos fractales que se escalan en forma anisotrópica se llaman autoafines y su invarianza de escala utiliza un factor diferente en dos direcciones perpendiculares entre sí. En este caso, en un plano *x,y* la invarianza de escala se aumenta o se reduce de acuerdo con:

$$x \to \gamma x \quad \text{y} \quad y \to \gamma^{\xi} y$$

donde $\xi \neq 1$ es el exponente de Hurst (1951), igualmente conocido como "exponente de Rugosidad". Este exponente se utiliza como una medida de la memoria a largo plazo de series de tiempo. Una serie de tiempo corresponde a un conjunto de observaciones ordenadas en el tiempo. Por ejemplo, evolución de la pluviometría, frecuencia de los sismos, distribución de los tonos de gris en una imagen de 8 bits.

Una de las técnicas más confiables para analizar dichos diagramas de frecuencia es el método de ventanas de ancho variable. El diagrama analizado se recorre con una ventana de tamaño *r* que se traslapa hasta barrerlo totalmente. Para cada posición de la ventana, se calcula la desviación estándar de las frecuencias *a(r)* del segmento del diagrama que cubre la ventana y se suma a los anteriores. Así se obtiene el promedio de la desviación estándar para cada tamaño de ventana.

$$h(r) = \frac{1}{np} \sum_{1}^{np} a(r)$$

donde la desviación estándar *a(r)* es igual a $a(r) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}$, y *np* es el número de veces que la ventana de tamaño *r* se desliza. El mismo tratamiento se repite para tamaños crecientes de la ventana.

El exponente de Hurst *H* o exponente de rugosidad ξ se obtiene a partir del gráfico $\log h(r)/\log r$ de acuerdo con la ecuación $h(r) \approx r^{\xi}$. En el plano log-log, la ecuación anterior toma la forma de una recta $\log(h(r)) \approx \xi \log(r)$. Si la gráfica

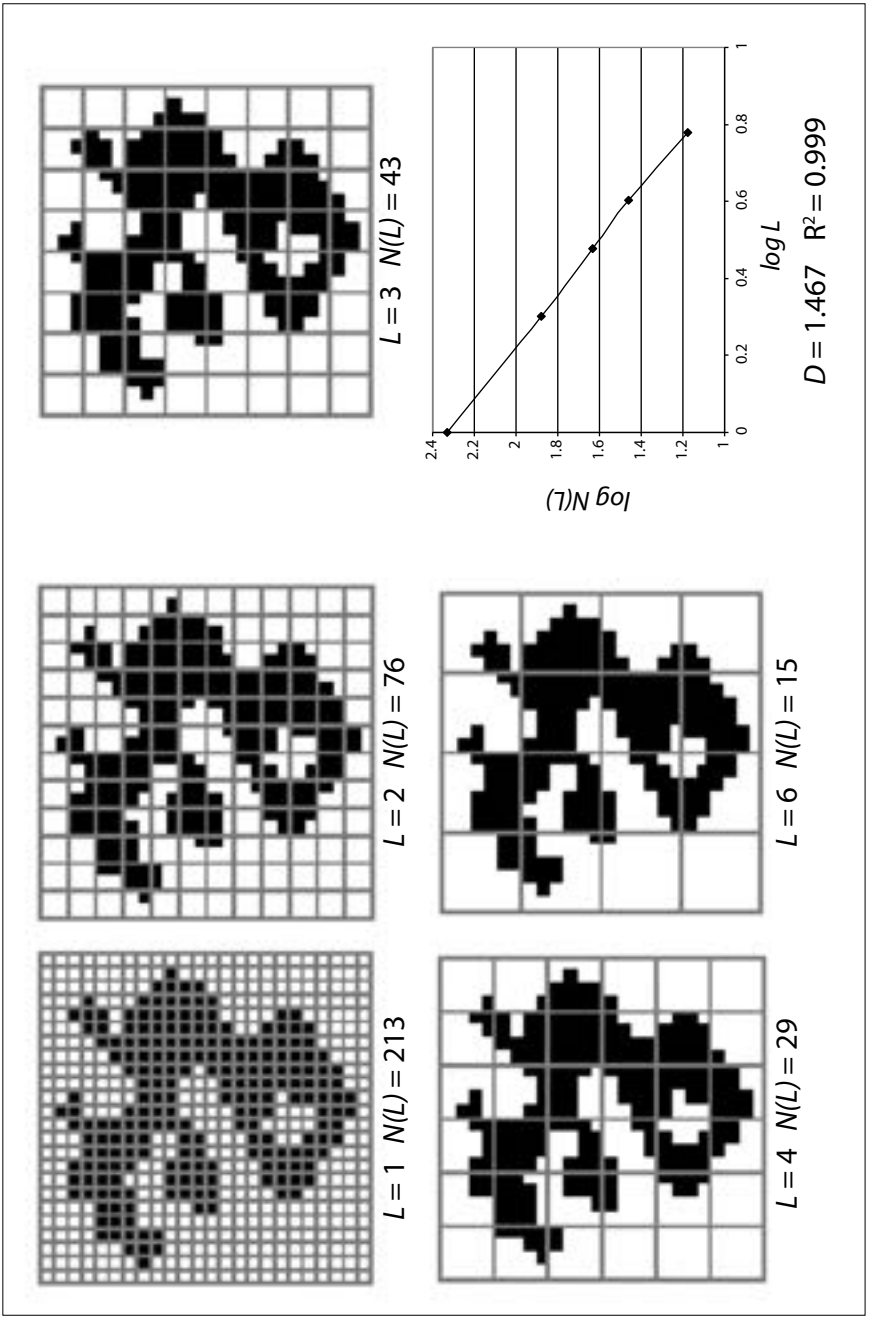


Figura 2. Ejemplo de conteo de cajas.

log$h(r)$/log$r$ es lineal, el diagrama tiene propiedades auto-afines y el exponente de Hurst corresponde a la pendiente de la línea recta que se ajusta a dicha gráfica. El exponente de Hurst no solamente mide la rugosidad del diagrama de frecuencia, sino también el carácter persistente del desarrollo del motivo. Según la conjetura de Mandelbrot (1983) existe una relación teórica $D = 2\text{-}\xi$ entre el exponente de Hurst y la dimensión fractal. El exponente de Hurst mide la rugosidad de un conjunto auto-afín y tiene como límites topológicos los valores 0 y 1.

Un valor 0.5 del exponente corresponde a un ruido blanco, es decir, que la serie de tiempo observada comprende datos estadísticamente independientes (sin memoria) y corresponde a un conjunto aleatorio. Los valores más grandes que 0.5 indican una persistencia de procesos, lo que traduce una fuerte periodicidad. En este caso la dimensión fractal se encuentra entre 1 y 1.5 en relación con una baja complejidad de los datos. Si el exponente es más pequeño que 0.5, se observa una anti-persistencia con memoria a largo plazo y el conjunto está altamente complejo.

Para ilustrar el proceso véase la Figura 3, en donde se muestra un tratamiento sobre un objeto euclidiano (el cuadrado) y un objeto fractal (el copo de nieve de Koch).

Las distancias entre el centro de gravedad cuyas coordenadas X_C y Y_C son iguales a $X_C = \frac{1}{Nbp} \sum_{i=1}^{Nbp} X_i$ y $Y_C = \frac{1}{Nbp} \sum_{i=1}^{Nbp} Y_i$ (donde Nbp es el número de

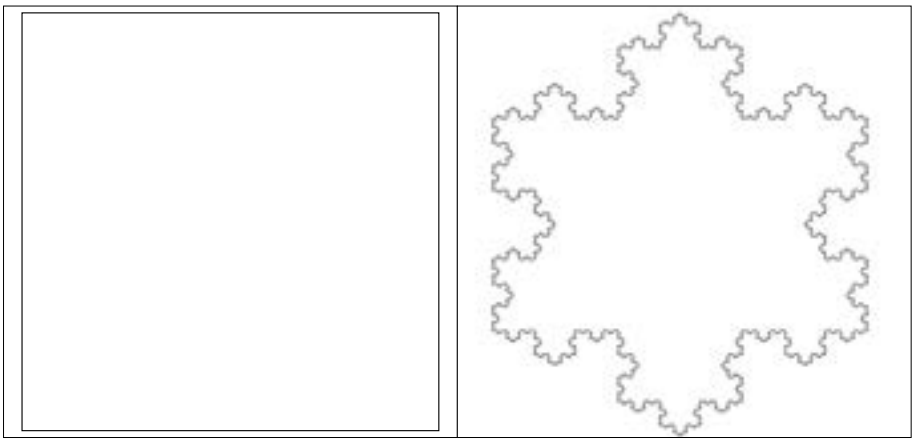


Figura 3. Representación de los objetos euclidiano y fractal. A. Cuadrado. B. Copo de Nieve o estrella de Koch.

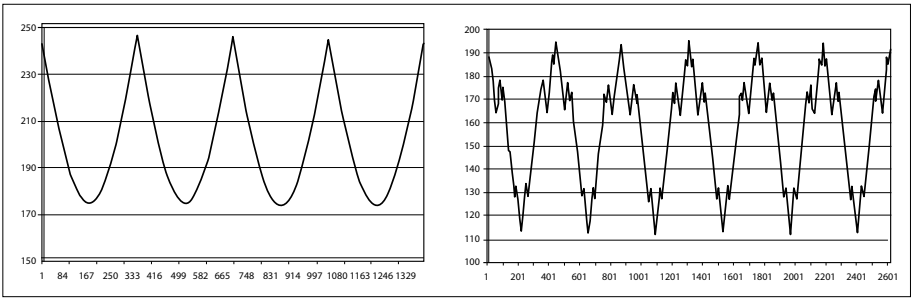
píxeles del objeto y X_i Y_i las coordenadas de los píxeles del objeto) y los *píxeles* que describen el perímetro de los objetos ya mencionados se reportaron en un diagrama de frecuencia (diagrama de Bode) lo que permite medir la rugosidad del perímetro (Figura 4).

Como se puede esperar en el caso del cuadrado, el valor de *x* es casi igual a 1; la diferencia proviene del tratamiento que elimina los píxeles de las cuatro esquinas del cuadrado para obtener una curva de camino 8, es decir, una curva formada por segmentos de 1 a n píxeles que solo se juntan por las esquinas. Lo mismo ocurre con el copo de nieve en donde su Dimensión Fractal calculada es de 1.23 contra un valor matemático de 1.25.

Parámetros de reconocimiento de patrones e índices de forma

El método de reconocimiento de patrones se inició para responder a los requisitos de la Robótica. El problema consistía en reconocer un objeto dentro de un grupo de objetos para elegirlo. Para la construcción de un sistema de reconocimiento de patrones se necesita definir una fase inicial de aprendizaje, es decir, buscar los mejores rasgos y elementos que permitan caracterizar un objeto. De esta manera se define un modelo M (α, β, γ … ω) cuyos parámetros permiten elegir con exactitud el objeto correspondiente al modelo. Es la etapa más importante del proceso.

Existen diferentes técnicas de clasificación: la automatizada, por discriminación funcional y por métodos estadísticos y estructurales; en realidad la calidad del resultado requiere a menudo una interfase entre dichos acercamientos. El éxito de un proceso de reconocimiento de patrones depende de la definición y se-



Cuadrado
ξ = 0.9575 R2 = 1

Copo de Nieve
ξ = 0.7678 R2 = 0.9999 DF = 1.2322

Figura 4. Diagramas de Bode de la distancia entre el centro de gravedad y el perímetro.

lección de los parámetros que pueden ser simples o complejos (Parker, 1994). Los parámetros simples se calculan en el espacio euclidiano, por ejemplo la superficie o el perímetro y las relaciones entre ambos.

Los parámetros más complejos son las medidas que impliquen comparar la forma en estudio con formas simples como son el cuadrado, el círculo o la zona convexa más pequeña que encierre dicha forma. Generalmente se necesita calcular el centro de gravedad, la presencia o la ausencia de una simetría de revolución. Se explican con más detalles estas definiciones en Parrot (2007).

No solo se pueden utilizar estos parámetros para elegir una forma, sino también para clasificar un conjunto de diversas formas como lo hace el software FROG_V2, el cual calcula un panel de parámetros que describen todas las formas estudiadas:

a) La superficie *SP* que corresponde al número total de *píxeles* (*npt*) que se encuentran en la forma estudiada.
b) Las coordenadas del centro de gravedad.
c) El número total de píxeles (*npp*) que pertenecen al perímetro (*Pp*).
d) La superficie *Sr* recalculada aplicando la fórmula de Pratt (1978) y se expresa de la manera siguiente:

$$Sr = \sum nps + \sum npp/2, \text{ donde } nps = npt - npp$$

También en función del valor en metros de la longitud del lado del píxel, es decir la resolución de la imagen, se indica el valor de la superficie en kilómetros cuadrados.

e) La longitud *Pl* del perímetro exterior (número de *píxeles* y longitud en kilómetros).
f) Un índice de "redondez" que corresponde a la relación *Pl/Sr*.
g) Un índice de convexidad *CI* igual a la relación *npt/npz* donde *npz* es el número total de *píxeles* que describen la zona convexa más pequeña que encierra al conjunto de *píxeles* estudiado.
h) Otro índice de convexidad es *RCI*, relación *npc/npp*, la cual toma en cuenta el número de píxeles del perímetro *Pc* de la zona convexa y el perímetro exterior *Pp* del tema estudiado; donde *npc* corresponde al número de *píxeles* que describen el perímetro *Pc*.
i) El número de huecos *NH*.

j) El tamaño mínimo y el tamaño máximo de estos huecos, así como el promedio del tamaño.
k) Un índice de porosidad *IP* que corresponde a la relación *nph/(nph+npt)*; donde *nph* es el número total de *píxeles* dentro de los huecos.
l) Un segundo índice de porosidad es *IPC* igual a *nph/npz*; *npz* se definió anteriormente.
m) El índice de convexidad externa que se basa en la relación entre la superficie *nph+npt* y la superficie *npz* de la zona convexa.
n) El índice de convexidad externa tomando en cuenta los perímetros externos.

Morfología matemática

La morfología matemática se desarrolló en 1964 en los laboratorios de la "Ecole des Mines", Paris. Su invención se justificó inicialmente para diversas aplicaciones industriales en el ámbito de la exploración minera, pero actualmente los procesamientos morfológicos toman en cuenta el tratamiento de las imágenes, por ejemplo aplicaciones como la segmentación, la detección de bordes, el análisis de textura, etc. Las obras de Matheron (1967, 1975) y Serra (1982, 1988) definen los conceptos básicos de esta disciplina.

La dilatación y la erosión son los operadores básicos de la morfología matemática. Prácticamente todos los otros pueden definirse basándose sobre éstos, a partir de composiciones de funciones y operaciones sobre los conjuntos.

Sin entrar en detalles, por lo menos se necesita definir las principales y primeras nociones que conciernen a la teoría de los conjuntos. Considerando diversos conjuntos (*X, Y, Z*…) y los elementos (*p, q, r, s*….) que dichos conjuntos contienen:

a) Dos conjuntos son iguales cuando están formados por los mismos elementos

$$X = Y \Leftrightarrow (p \in X \Rightarrow p \in Y \text{ y } p \in Y \Rightarrow p \in X).$$

La igualdad es reflexiva, simétrica y transitiva. Un conjunto vacío se nota Ø.

b) *X* es un subconjunto de *Y* si todos los elementos de *X* pertenecen a *Y*

$$X \subseteq Y \Leftrightarrow (p \in X \Rightarrow p \in Y).$$

La inclusión es reflexiva, antisimétrica y transitiva.

c) La intersección de dos conjuntos X y Y corresponde al conjunto de los elementos que pertenecen a ambos conjuntos:

$$X \cap Y = (p \mid p \in X \text{ o } p \in Y).$$

La intersección es conmutativa, asociativa e idempotente. Esta última propiedad significa que $X \cap X = X$.

d) La unión de dos conjuntos se constituye por los elementos que pertenecen a uno o al otro.

$$X \cup Y = (p \mid p \in X \text{ o } p \in Y).$$

Al igual que la intersección, la unión es conmutativa, asociativa e idempotente.

e) Finalmente la diferencia entre conjuntos la componen los elementos que pertenecen a X pero que no están incluidos en Y. Esta operación no es conmutativa.

$$X \setminus Y = (p \mid p \in X \text{ o } p \notin Y).$$

Los operadores básicos de la morfología matemática tales como la dilatación y la erosión utilizan un "elemento estructural" que juega el papel de modelo estructural y que se traslada sobre todas la partes de la imagen binaria considerada como un conjunto. Las relaciones entre la imagen y el elemento estructural pueden ser del tipo "incluidas en el conjunto", o "tocadas por el conjunto".

Los elementos estructurales más clásicos son la cruz, constituida por el origen y los cuatro puntos cardinales más cercanos, y el cuadrado, constituido por el origen y los ocho puntos más cercanos. Estos dos elementos estructurales corresponden respectivamente a dos definiciones posibles de la vecindad o la conexión de la imagen.

En el caso del tratamiento referente al software FROG_V2, se utiliza una alternancia entre cruz y cuadrado para crear un motivo hexagonal que responde mejor a una dilatación isotrópica.

La Figura 5A ilustra el resultado obtenido por dilatación (1 y 2 iteraciones) y la Figura 5B por erosión (1 y 2 iteraciones). La dilatación morfológica no es reversible en general. La operación que intenta hasta cierto punto producir el inverso de la dilatación es la erosión morfológica.

El uso de estas dos operaciones genera dos operaciones complementarias: el cierre y la abertura. Una dilatación combinada con una erosión utilizando el mismo elemento estructural no produce una identidad, sino otros dos operadores morfológicos.

La apertura que consiste en una erosión seguida por una dilatación puede caracterizarse geométricamente como la unión de todos los operadores incluidos en el conjunto de píxeles binarios. Así la forma del elemento estructural permite elegir las estructuras que contiene el conjunto (Figura 5C) y el cierre corresponde a una dilatación seguida por una erosión (Figura 5D).

El cierre y la apertura son operaciones crecientes e idempotentes,[8] dos propiedades que caracterizan los filtros morfológicos. El cierre es extensivo y la apertura anti-extensiva. A pesar de modificar el contorno de los objetos, la apertura y el cierre morfológicos constituyen herramientas útiles para filtrar una imagen. Una propiedad interesante del cierre es que atenúa la rugosidad del contorno.

El software FROG_V2 y sus diversas funciones

FROG_V2 es un software que calcula la dimensión fractal de los objetos utilizando diferentes tratamientos, a partir de imágenes con formatos *raw* o *bmp*. La variedad de los tratamientos propuestos para medir la dimensión fractal, así como los acercamientos complementarios que infieren y validan los diversos resultados, deriva de la problemática y de los tipos de objetos a estudiar. De hecho, pueden surgir conclusiones erróneas cuando se usa un solo tipo de tratamiento ya que la validez de los resultados depende del nivel de congruencia entre la forma estudiada y el tipo de medida.

Una primera función del menú permite extraer un objeto de la imagen según sus valores en tono de gris para caracterizar su forma por medio de una función lineal, conteo de cajas, movimiento browniano, etc. Esta extracción implica la interpretación visual del tono de gris; la noción de rugosidad de los tonos de gris (véase entre otros la función *thresholding fractal*) ayuda a definir los valores

[8] Adj. MAT. En un conjunto donde se ha definido una operación simbolizada por *, se dice del elemento a que cumple $a * a = a$.

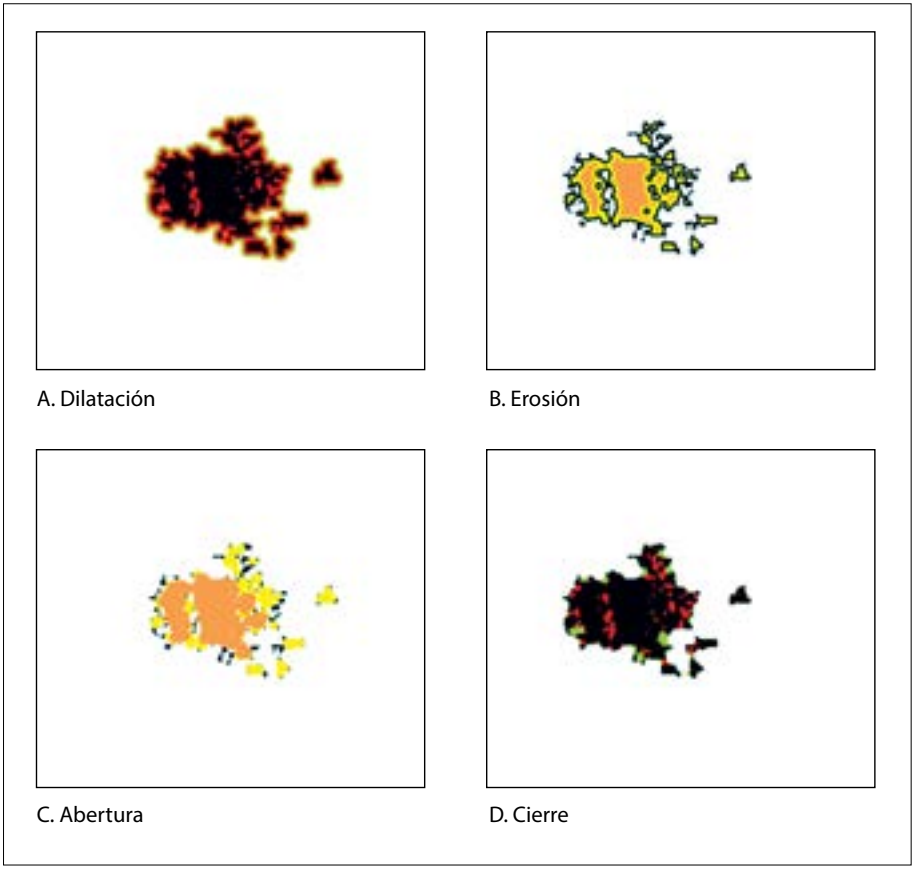


Figura 5. Ejemplos de tratamientos de Morfología Matemática sobre la zona urbana de Toluca en 1973 (imagen original Landsat MSS). Tema inicial en negro. A. Dilatación (rojo = una iteración; verde = 2 iteraciones. B. Erosión (Amarillo = una iteración; Anaranjado = dos iteraciones). C. Abertura (Amarillo = una iteración; Anaranjado = dos iteraciones) D. Cierre (rojo = una iteración; verde = 2 iteraciones).

del umbral. Con la imagen binaria así obtenida, se puede hacer un etiquetado separando los diversos elementos que componen eventualmente el objeto en estudio, de tal manera que sea posible comparar los diferentes componentes conectados. Una vez obtenida una imagen etiquetada, una serie de nuevas funciones permiten manipular los elementos de dicha imagen, todo esto con el objetivo de especificar y definir sus valores en tonos de gris, de agruparlos manualmente o

con la ayuda de la morfología matemática; así es posible caracterizar los rasgos de un conjunto reconstituido por medio de la dimensión fractal aplicada a la superficie del objeto o por medio de la distribución de sus tonos de gris.

Otros parámetros calculan directamente sobre la escala en tonos de gris: la dimensión fractal local, la dimensión fractal radial, la rugosidad fractal, la dimensión prismática, etc. Estas funciones consideran la escena entera o los elementos obtenidos utilizando la binarización o el etiquetado.

Por otra parte, es posible extraer las secuencias de tonos de gris de la escena entera, explorar linealmente dichos tonos o usar los elementos binarios como máscara. La secuencia obtenida de esta manera permite calcular varios parámetros tales como el exponente de Hurst.

En la nueva versión del software se añadió un panel de tratamientos agrupados en un sub-menú que corresponde al estudio del espacio urbano (exploración fractal del espacio, distancia al perímetro, entre otros). Finalmente, el software crea un informe general en donde se reportan todas las operaciones efectuadas, los valores de los parámetros obtenidos, así como el nombre de las imágenes y de los diagramas registrados, es decir, de todos los resultados obtenidos. La nueva versión del software es más amigable, ya que se integraron novedosas funciones tales como: el registro de una paleta o la posibilidad de modificar directamente los datos sobre la pantalla. Es decir que, en la versión presente, el software FROG_V2 representa una herramienta indispensable para estudiar la dimensión fractal en sus diversos aspectos.

Extracción de los rasgos urbanos

Existen varios tratamientos que permiten extraer las zonas edificadas. Sin embargo, solo se presentan aquí dos tipos de tratamiento. El primero consiste en definir los valores de reflectancia de las zonas de entrenamiento (techos y terraza de las casas y edificios) para cada banda de una imagen de satélite. En este caso el programa *multidim_class.exe* (Parrot, 2005) define a partir de estos valores, cuáles son los conjuntos de *píxeles* que corresponden al tema seleccionado. Por otro lado, Zha *et al*. (2003) propusieron utilizar índices de reflectancia tales como el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) y el *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) para extraer los edificios e inmuebles; se verá aquí como se puede mejorar este acercamiento para responder mejor a esta problemática.

Umbral y clasificación

Se da un ejemplo. Con las zonas de entrenamiento definidas sobre una imagen Landsat ETM+ de la ciudad de Toluca del 2000 y considerando los diversos tipos de *edificios* que se presentan en esta zona urbana, se definen los valores de umbral correspondientes al tema en estudio sobre tres bandas (3, 4 y 5). De esta manera se obtienen en la zona central divisiones para cada banda. Los rangos de valores del umbral son los siguientes: 115-140 (banda 3), 90-150 (banda 4) y 90-140 (banda 5).

Siguiendo la misma metodología se definen en segundo lugar los siguientes rangos de valores del umbral complementarios, los cuales corresponden sobre todo a los edificios comerciales e industriales: 200-255 (banda 3), 190-255 (banda 4) y 200-255 (banda 5). Posteriormente se juntan ambas imágenes resultantes con el programa superpos.exe (Parrot, 2004), para obtener un tema o grupo de *píxeles* más completo de las zonas edificadas. Lo que hace el programa es tomar el código inicial de cada imagen y unirlos en una única imagen asignándoles un nuevo código (Figura 6).

De hecho, para obtener una imagen completa de todos los tipos de construcciones que componen una ciudad, se requeriría considerar toda la gama del material de construcción de los techos y terrazas, así como la presencia o ausencia

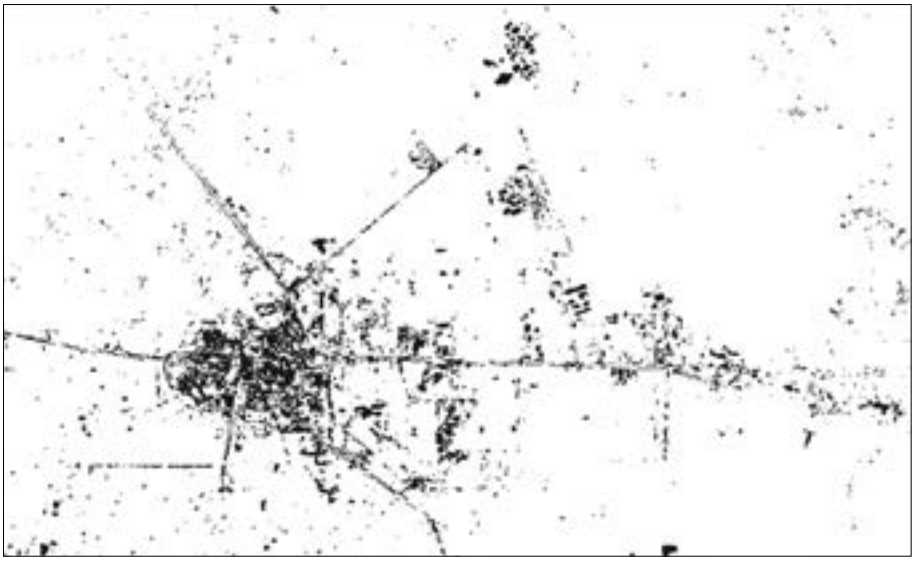


Figura 6. Edificios de la zona urbana de Toluca en 2000.

y el tipo del material de impermeabilización, todo esto con el fin de interpretar las distintas respuestas espectrales de la imagen de satélite, mismo que precisaría de una exhaustiva validación en el terreno, para obtener una clasificación más amplia y fiel cercana a la realidad.

Utilización del NDVI y del NDBI

El principio del algoritmo propuesto por Zha *et al*. (2003) y modificado por Chunyang He y Dingyong Xie en 2008, quienes tomaron en cuenta la aproximación de la segmentación semi-automatizada llamada "Double-Window Flexible Pace Search [DFPS]" propuesta por Chen *et al*. (2003), se basa sobre la interdependencia que se supone existir entre el *NDVI* y el *NDBI*.

El *NDVI* [*Normalized Difference Vegetation Index*] corresponde a la relación:

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

Por otra parte, el *NDBI* [*Normalized Difference Built-up Index*] se basa sobre una relación similar que toma en cuenta las bandas TM4 y TM5.

$$NDBI = \frac{TM5 - TM4}{TM5 + TM4}$$

En ambos casos, los valores del *NDVI* y del *NDBI* están comprendidos entre -1 y 1 (valores normalizados entre 0 y 255 en las imágenes en tonos de gris). El algoritmo considera que para el *NDVI* la vegetación activa va de 0 a 1; por esta razón las zonas edificadas corresponden a un valor del *NDVI* entre -1 y 0; por otro lado, estas zonas corresponden para el *NDBI* a un valor entre 0 y 1. Sin embargo, los resultados que se obtienen siguiendo escrupulosamente el algoritmo desarrollado por Chunyang He y Dingyong Xie (*op. cit*.) no corresponden totalmente a las zonas edificadas. De hecho los autores plantean que cuando la vegetación se hace más escasa el algoritmo extrae estos datos con dificultad.

En realidad se necesitan analizar los histogramas de las imágenes resultantes de estos dos índices (Figura 7) para definir con precisión los valores que corresponden a la ausencia de vegetación activa en el caso del *NDVI* y los valores que cubren eventualmente la zona edificada en el caso del *NDBI*.

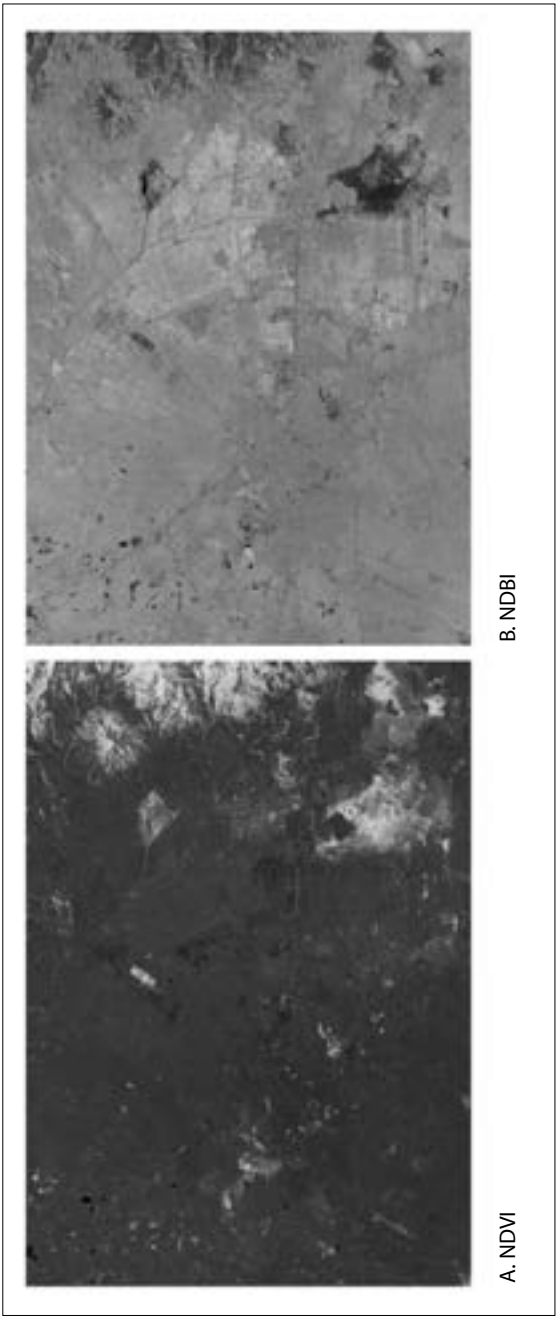


Figura 7. Imágenes de los dos índices.

El análisis de los histogramas de la Figura 8 permite definir el umbral de cada índice y proponer un tratamiento alternativo que mejora la respuesta espectral. El programa *multidimclass.exe* (Parrot, 2005) hace una clasificación de los píxeles en función del valor de los segmentos de cada imagen (Tabla 1 y 2).

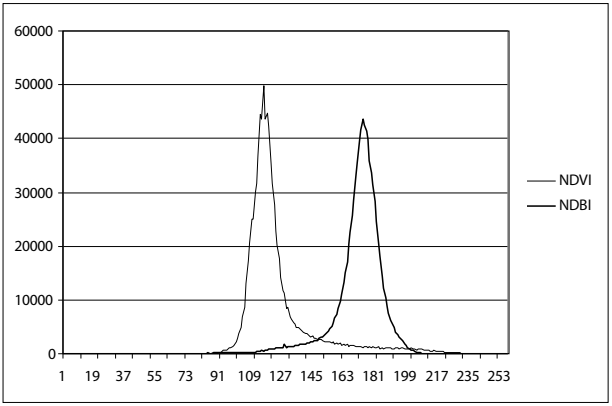


Figura 8. Histogramas de los dos índices.

Tabla I. Definición de los segmentos en cada banda

NDBI			
3 segmentos	28-135	136-165	166-243
NDVI			
3 segmentos	29-61	62-114	115-255

Tabla 2. Códigos de los diferentes cruces obtenidos

Códigos	NDBI	NDVI	Número de píxeles
1	1	1	0
2	1	2	1066
3	1	3	30408
4	2	1	0
5	2	2	56734
6	2	3	133583
7	3	1	0
8	3	2	268424
9	3	3	389785

El código 5 de la Tabla 2 corresponde al cruce de los dos segmentos (2 – 2) donde se ubican los píxeles que dibujan los edificios. El resultado se reporta en la Figura 9.

Aplicación del software en la ciudad de Acapulco

En este apartado se da un ejemplo de cómo se aplica el procedimiento descrito anteriormente a un espacio geográfico como la ciudad de Acapulco utilizando imágenes de satélite Landsat ETM del 2002 de 30 m de resolución.

Extracción de la zona urbana

La imagen resultante de dicho tratamiento se presenta en la Figura 10, donde el código 7 (en rojo sobre la imagen) corresponde al tema "edificios", el cual se reporta en una imagen binaria (Figura 11). El número de segmentos definidos en las imágenes del *NDVI* y del *NDBI* de Acapulco es mayor que en el caso de Toluca,

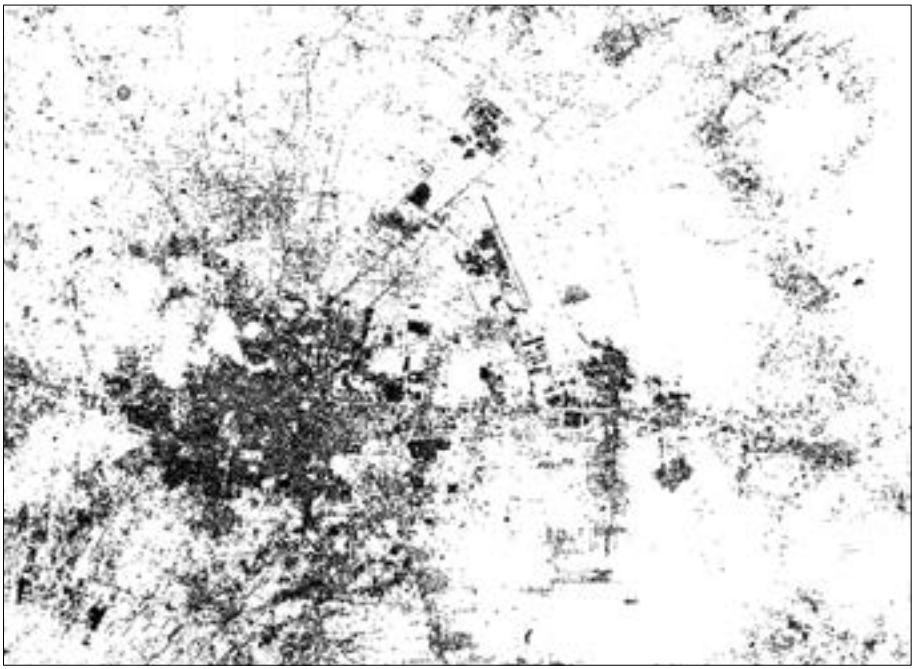


Figura 9. Zona edificada obtenida con el proceso NDVI-NDBI supervisado.

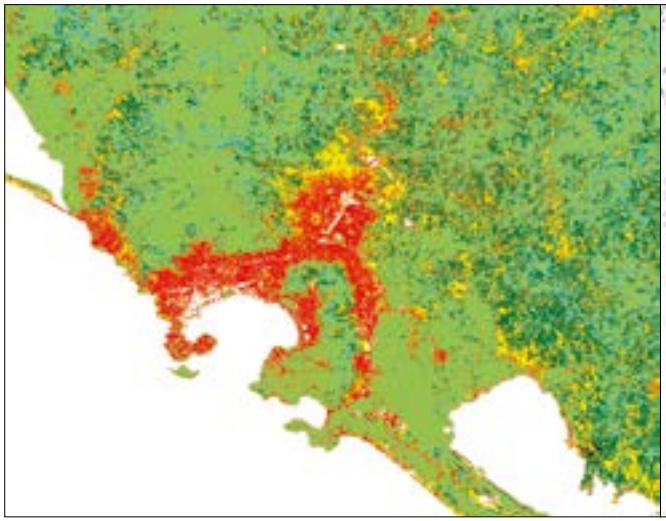


Figura 10. Imagen proveniente del cruzamiento de los segmentos del NDVI y del NDBI.

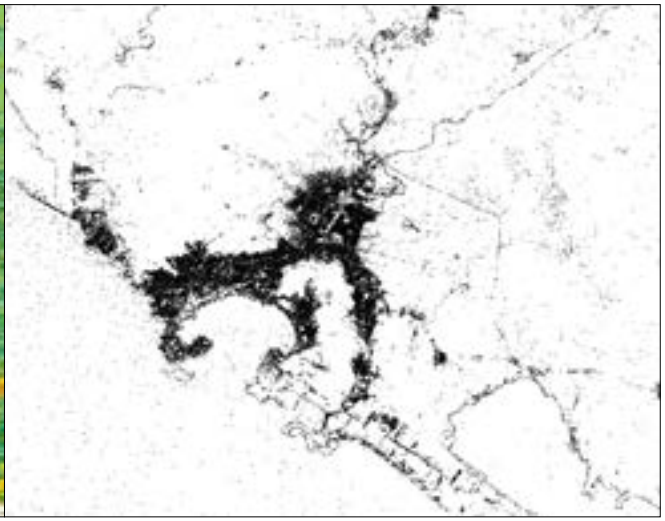


Figura 11. El código 7 de la imagen de la figura 10 corresponde al tema "edificios".

ya que se encuentran en estas imágenes valores que conciernen a los cuerpos de agua.

El uso de un cierre morfológico sobre la imagen de la Figura 11 muestra dónde se ubican los diferentes núcleos urbanos (Figura 12). De hecho, el código 7 corresponde no solo a los edificios sino también a una parte de la red vial cuyo material tiene un valor de reflectancia similar al de algunos techos.

El etiquetado da la posibilidad de eliminar conjuntos de píxeles que contienen menos de cien elementos, es decir, menos de 9 ha; 19 conjuntos de píxeles se generan (Figura 13). En primer lugar se puede calcular la dimensión fractal de cada uno de estos conjuntos a partir de un conteo de cajas.

Para hacer este cálculo es necesario que cada conjunto se estudie por separado, es decir, se coloca en una sub-región rectangular la más pequeña posible que encierre la forma de éste, con el fin de no minimizar el efecto de la invasión del espacio por el conjunto. La función *Resizing Box Counting* del software hace todo este tratamiento (Figura 14). El valor de la dimensión fractal DF traduce el nivel de complejidad de cada unidad y la relación existente entre los espacios edificados y los espacios verdes.

Por otro lado, para caracterizar cada conjunto de la imagen se utiliza el tratamiento de Reconocimiento de Patrones, el cual nos da información sobre la superficie, la longitud del perímetro, la presencia de huecos y diversos índices, como son los índices de convexidad y de porosidad reportados en el diagrama de la Figura 15. En el caso de Acapulco, los conjuntos son poco convexos y el índice de porosidad es a veces alto. Por ejemplo, la zona más grande (zona central número 4 en la Figura 19) cuyo perímetro y cuya superficie son respectivamente iguales a 45 km y 23 km^2, tiene un índice de porosidad de 24.71 y un índice de convexidad de 32.54.

La noción de porosidad traduce la presencia de huecos en la estructura urbana. Dichos huecos corresponden a espacios libres (carreteras, plazas o a veces cuadras en construcción) y a zonas con vegetación. La repartición de todos los elementos en el espacio urbano da información sobre el nivel de desarrollo de las diversas estructuras urbanas. Por ejemplo, un barrio residencial conlleva generalmente zonas de vegetación importantes; por el contrario, un barrio industrial registra una fuerte densidad de edificios industriales dispersos sobre suelos desnudos.

Análisis por fracciones de cobertura (el algoritmo BVS)

Con el objetivo de relacionar la distribución de los edificios, los espacios verdes y los espacios libres con el dinamismo socio-económico de las diversas zonas que

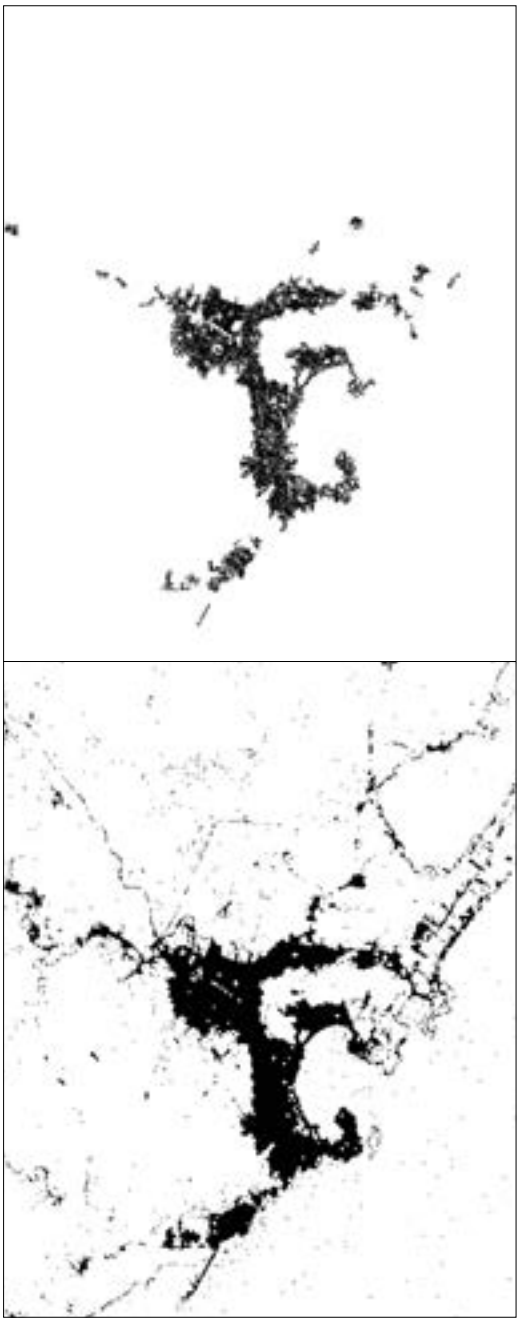


Figura 12. Aplicación de un cierre sobre el tema "edificios".

Figura 13. Extracción de los conjuntos que contienen cien o más de cien píxeles.

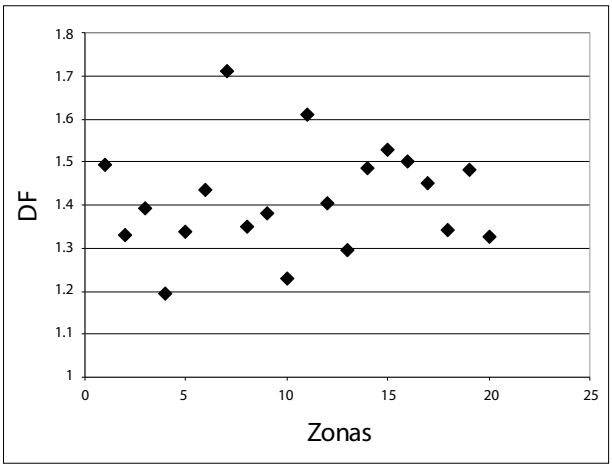


Figura 14. Valor de la dimensión fractal en las diferentes zonas.

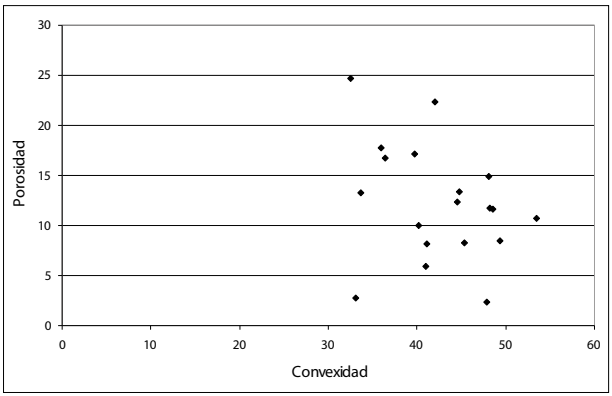


Figura 15. Diagrama índice de porosidad *versus* índice de convexidad.

componen una ciudad, se desarrolló (Parrot, 2009a) el programa BVS [*Building-Vegetation-Soils*]. Este programa permite analizar en detalle la distribución de los componentes del espacio urbano en diferentes niveles de observación (nivel global, nivel de las zonas o de las cuadras).

Dentro de una ventana móvil de tamaño *m* x *m*, se calcula el porcentaje de ocupación de cada componente encontrado en esta ventana. Para cada posición de la ventana móvil, estos porcentajes se reportan en un diagrama triangular. El valor de los diferentes puntos corresponde a una escala en tonos de gris que se relaciona con el número de veces que se encontró una misma posición. Cabe señalar que la dinámica de una imagen de un byte (0.255) necesita normalizar la escala original dentro de este espacio en función de la fórmula: $Vtg = (V_i/Max_V)*255$,

donde V_i es el valor original de la ocurrencia, *Max_V* el valor máximo de la ocurrencia y V_{tg} al valor reportado en el diagrama triangular.

El programa BVS divide el triángulo en 16 sub-triángulos dando a cada uno un color diferente (Figura 16). La definición de estos colores obedece a una atribución lógica que divide los tres colores fundamentales (rojo, verde y azul) de la siguiente manera. Para cada color se definieron cuatro niveles; de 1 a 24%, valor 0; de 25 a 49%, valor 85; de 50 a 74%, valor 170; y finalmente para un porcentaje igual o superior a 75%, valor 255. Los colores se mezclan en función de la composición de los triángulos. Por ejemplo, si los porcentajes respectivos de rojo, verde y azul son de 60, 30 y 10%, respectivamente, el color correspondiente será de 170 para el rojo correspondiendo a los edificios, de 85 para el verde que corresponde al porcentaje de áreas verdes y de 0 para el azul (suelos desnudos).

Esta gama de colores se puede guardar en una paleta con el fin de recuperarla y aplicar la misma paleta de color al documento final.

Como ejemplo, se estudiaron dos regiones A y B de la zona 4 (zona central de la ciudad de Acapulco; Figura 19).

En la región A existen muchos espacios verdes y espacios libres a pesar de la densidad de los edificios; así, como lo muestran la Figura 17A y la Figura 18, el centro de gravedad de la nube de puntos (puntos rojos y anaranjados) se concentra alrededor de B75, V10 y S15, es decir, en los sub-triángulos 1 y 3, y se observa la existencia de tres prolongaciones en dirección de los espacios verdes

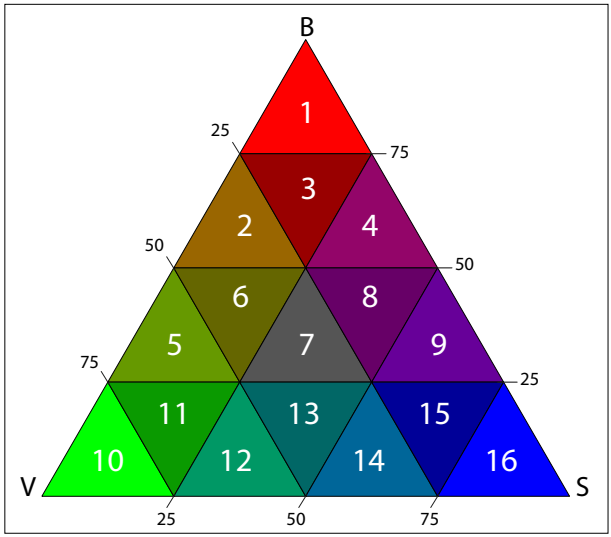


Figura 16. Gama de color de los 16 sub-triángulos de la clasificación BVS.

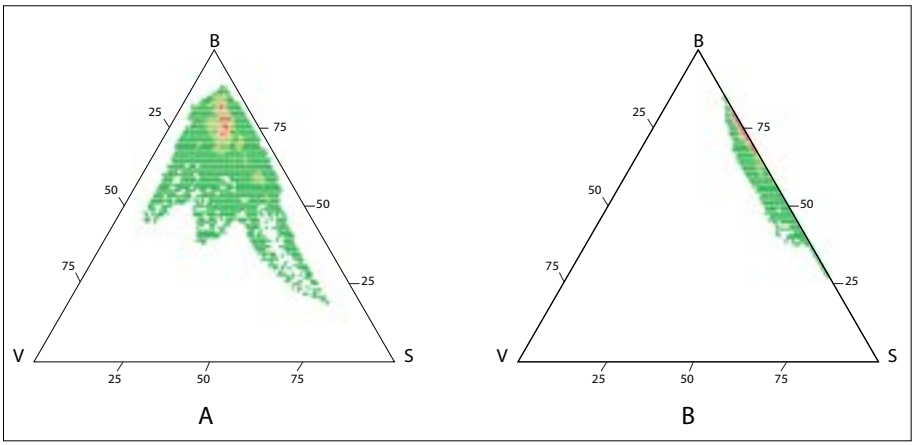


Figura 17. Análisis de la repartición de los edificios, la vegetación y los suelos desnudos en dos regiones de la zona 4. A. región norte; B. región suroeste.

y de los espacios libres. En la región B no hay tantos puntos correspondientes a espacios verdes y los puntos siguen la línea BS del triángulo (Figura 17B) con una concentración alrededor de B75, V0 y S25, es decir, en los sub-triángulos 1 y 4 (Figura 18).

También, se pueden extraer los diversos huecos que contiene eventualmente un conjunto de *píxeles* para ver si éstos se agrupan en varias familias utilizando los parámetros de reconocimiento de patrones.

La extracción del perímetro externo de cada zona permite calcular la distancia entre el centro de gravedad y los *píxeles* que componen el perímetro, lo que abre la posibilidad de medir la rugosidad del perímetro utilizando el exponente

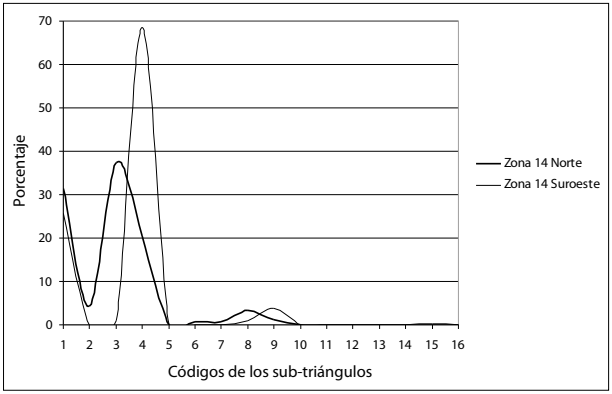


Figura 18. Distribución de los puntos en los 16 sub-triángulos.

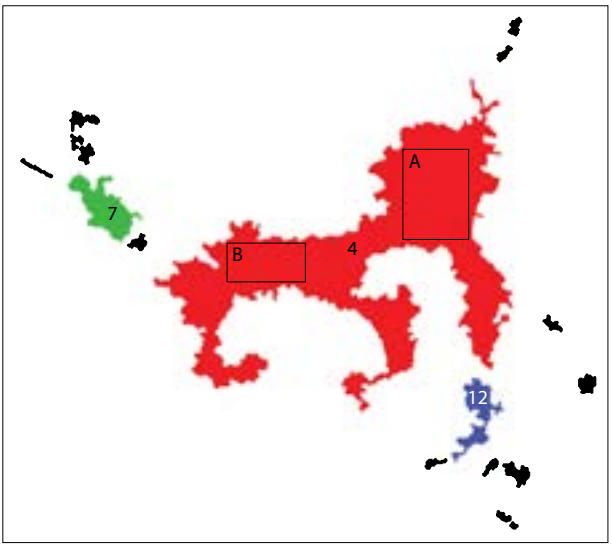


Figura 19. Extracción del perímetro y llenado de las zonas. Posición dentro de la zona 4 de las dos regiones A y B estudiadas con el programa BVS.

de Hurst y definir un nuevo parámetro **Ψ**. Este nuevo parámetro es igual a: $\Psi = (Pm/(Pm + \sigma))\times 100$, donde *Pm* corresponde al promedio de la distancia y *s* a la desviación estándar. Los resultados se reportan en la Tabla 3.

El cálculo de la distancia entre los *píxeles* del perímetro y el centro de gravedad se realiza a partir del píxel inferior izquierdo y la medida sigue todo el contorno a partir de este primer píxel. Se obtiene un diagrama de Bode para cada perímetro (véase el diagrama del perímetro de la zona 4 en la Figura 20). Se calcula el valor del exponente de Hurst a partir de dichos diagramas (Figura 21).

Se nota que las zonas 4 y 7 tienen una rugosidad menor que la zona 12. Existe una relación entre el parámetro **Ψ** y el exponente de Hurst; entre más grande sea el valor del parámetro **Ψ**, menor será el valor del exponente de Hurst (Figura 22).

Por otro lado, con el editor de pantalla del software FROG_V2 se pueden rellenar las zonas delimitadas por sus perímetros exteriores ya extraídos; así, se puede calcular la repartición de la densidad y homogeneidad de los edificios en dichas zonas y la repartición de la dimensión fractal calculada dentro de una ventana móvil.

Se requiere dar algunas explicaciones sobre el cálculo de la homogeneidad y la densidad de los edificios dentro de una ventana móvil. Como lo muestra la Figura 23, cuando el píxel central de una ventana móvil corresponde al tema en estudio, la presencia de *píxeles* del mismo valor en la ventana permite calcular un

Tabla 3. Valores del parámetro Ψ y del promedio de la distancia en las zonas

Zonas	Parámetro Ψ	Promedio de la distancia
1	80.22	10.43
2	77.06	7.70
3	72.76	7.27
4	70.87	155.92
5	70.02	12.60
6	75.77	6.82
7	81.39	8.95
8	66.71	11.34
9	76.57	34.46
11	79.03	8.69
12	73.77	8.11
13	87.38	10.48
14	88.25	139.07
15	65.05	9.76
16	69.21	8.31
17	78.75	12.60
18	79.46	6.36
19	88.16	3.53

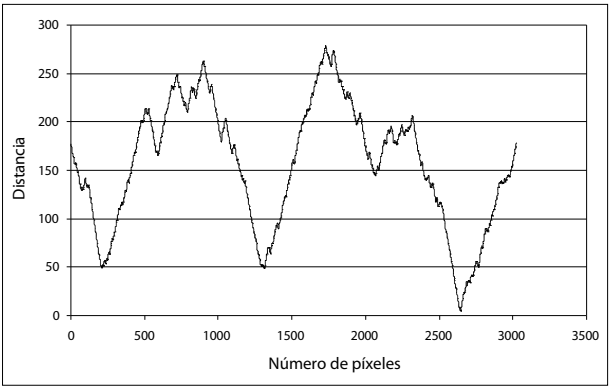


Figura 20. Diagrama de Bode de la distancia entre los píxeles del perímetro y el centro de gravedad de la zona 4.

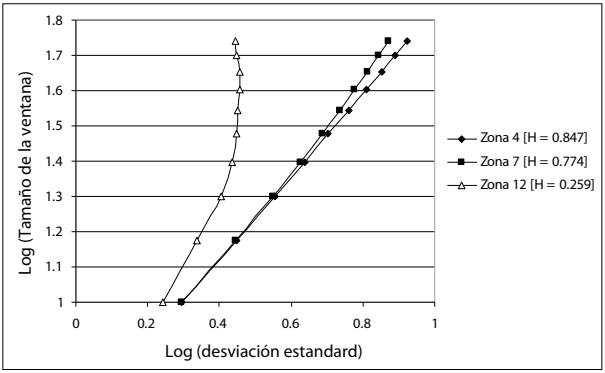


Figura 21. Valor del exponente de Hurst de las tres zonas principales.

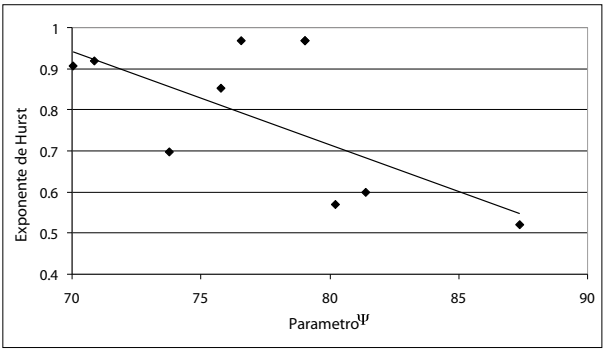


Figura 22. Histograma bidimensional Exponente de Hurst *versus* Parámetro Ψ.

porcentaje. En este caso se trata solamente de una densidad y no de una textura. El estudio de la textura como se verá más adelante, se relaciona con el cálculo de la dimensión fractal en una ventana móvil.

En la gráfica de curvas de la Figura 24 se muestra cómo se reparten cuatro rangos de densidad en las tres zonas urbanas principales de Acapulco. La zona 4 se caracteriza por su densidad alta.

Con la máscara de las diferentes zonas de la Figura 19, es posible, como se hizo para la homogeneidad, medir la repartición de la textura en dichas zonas por medio del tratamiento siguiente. El cálculo se basa utilizando una ventana móvil de 13 × 13 o 25 × 25 *píxeles* para medir en estas ventanas la dimensión fractal por medio de un conteo de cajas. En realidad, porque con estos tamaños (m x m) existen solamente dos divisores, se utilizan cuatro medidas sobre cuatro ventanas de 12 × 12 en el primer caso o de 24 × 24 en el segundo. El rango r de una ventana móvil de tamaño m x m (m debe ser un número impar) es igual a

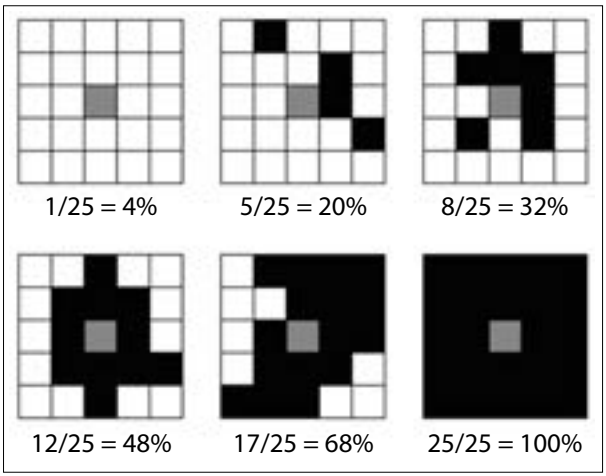


Figura 23. Cálculo de la densidad.

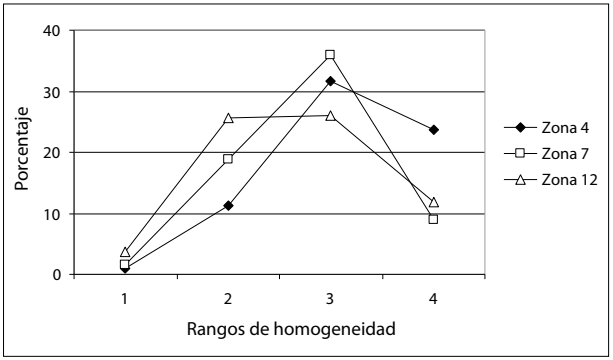


Figura 24. Rangos de homogeneidad en las tres zonas principales. 1 = 1-25%; 2 = 26-50%; 3 = 51-75%; 4 = 76-100%.

(*m*-1)/2 . Así para un ventana *m* × *m* centrada en un píxel *i, j* (coordenadas del píxel; *i* para las líneas y *j* para las columnas), las coordenadas del píxel de la esquina superior izquierda del primer sector de dimensión *m-1* × *m-1* serán iguales a *i-r, j-r*; en el caso del píxel de la esquina superior izquierda del segundo sector *i-r, j-r+1*. Las coordenadas del píxel de la esquina superior izquierda del tercer sector corresponderían a *i-r+1, j-r*. Y finalmente las coordenadas del píxel de la esquina superior izquierda del cuarto sector serán iguales a *i-r+1, j-r+1* (Figura 25). De esta manera se obtiene un número de divisores suficiente (1, 2, 3, 4, 6 y 12 en el primer caso y 1, 2, 3, 4, 6,12 y 24 en el segundo) para calcular la dimensión fractal en cada sector. Al final se realiza el promedio de estas cuatro medidas y se registra el resultado en el píxel central de la ventana móvil.

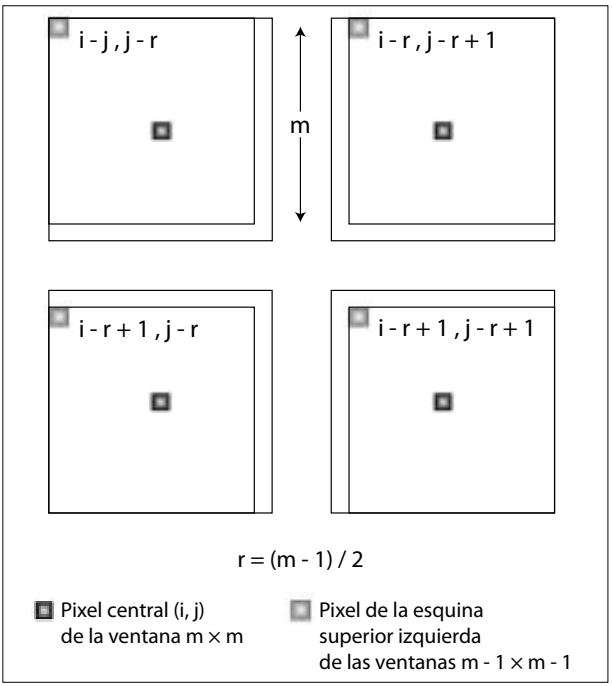


Figura 25. Cálculo de la dimensión fractal en una ventana móvil.

Los histogramas de la Figura 26 ilustran la repartición de la textura dentro de las tres principales zonas mostrando el comportamiento particular para cada una. La zona 4 corresponde a la zona urbanizada densa y el histograma de frecuencia de la DF de dicha zona presenta un pico alrededor del valor 1.80. Al contrario, el histograma de frecuencia de la zona litoral 7 que se está desarrollando se presenta como una curva bi-modal que traduce la heterogeneidad de esta zona.

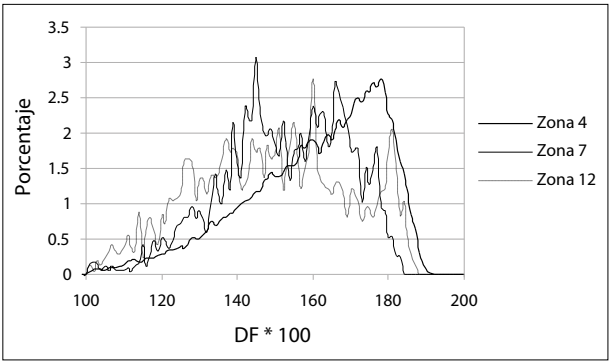


Figura 26. Histograma de la repartición de la Dimensión Fractal en las tres zonas principales.

En estas páginas se dieron algunos ejemplos de tratamiento, pero existen otros más, los cuales se hubiesen podido utilizar para estudiar los diversos elementos que forman la ciudad de Acapulco. Es el caso del movimiento browniano, del cálculo de la dimensión fractal a partir de la medida de la longitud del perímetro con patrones de tamaño creciente, del cálculo de esta misma dimensión a partir de un llenado con círculos de tamaño creciente, etcétera.

Epílogo

Sin duda los eventuales lectores que tuvieron el valor de llegar hasta este punto, se dieron cuenta de que no hay ninguna conclusión correspondiente a los tratamientos presentados en el apartado anterior. La intención era mostrar lo que puede aportar el uso de diversos aspectos de la medición de la dimensión fractal así como la morfología matemática y el reconocimiento de patrones. El asunto del espacio urbano no corresponde a mi especialidad y como se dice en francés "Cada uno dedicado a su profesión y las vacas serán bien guardadas" o bien en español "Zapatero a tus zapatos". Se podrían haber tomado en cuenta otros temas de aplicación, pero en una conferencia que sobre la dimensión fractal, se mostró el aporte del exponente de Hurst en el estudio de la rugosidad de un perímetro urbano. Se tomó como ejemplo el caso del perímetro de la Ciudad de México entre los años 1954 y 2001 mostrando que el incremento progresivo del valor del coeficiente de Hurst (de 0.782 hasta 0.880) traducía la compactación de esta zona urbana que no solo se come por el interior sino por la invasión de toda zona libre en la periferia llegando a una suavización del perímetro. A partir de este ejemplo se propuso un esquema que tal vez podría explicar el desarrollo de un ciudad de América Latina desde la época colonial hasta el presente (Figura 27).

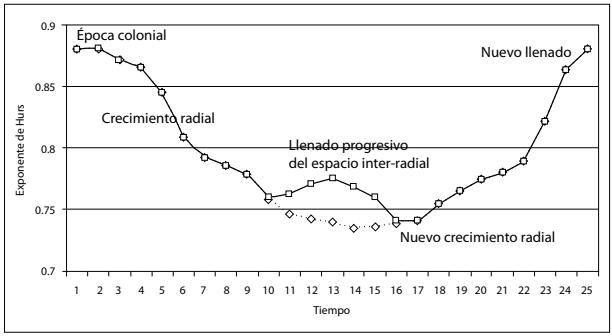


Figura 27. Evolución hipotética del exponente de Hurst del perímetro urbano en función del tiempo.

Por otro lado, el objetivo no era el enfoque sobre una aplicación, sino mostrar el aporte del software que desarrollé para cualquier estudio que necesita basarse sobre el uso de la dimensión fractal: paisajes, espacios tridimensionales, deforestación, suelos, etc. Ojalá que FROG_V2 sea una herramienta (que se puede mejorar en el futuro en función de las observaciones de los usuarios) útil para los equipos de investigación que lo van a utilizar.

Capítulo 7. Reconocimiento automatizado de las zonas de encharcamiento a partir de un Modelo Digital de Elevación. Ejemplo de la zona urbana de Valle de Chalco, México

Carolina Ramírez Núñez
Posgrado en Ciencias de la Tierra,
Universidad Nacional Autónoma de México

Jean-François Parrot
Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

En este trabajo se desarrollaron simulaciones para detectar las áreas sensibles de encharcamiento en la zona urbana de San Miguel Xico con base en un Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolución. Este tipo de modelación espacial provee los elementos necesarios para determinar áreas de vulnerabilidad asociadas al hundimiento diferencial que afecta actualmente la zona del Nuevo Lago de Chalco; las deformaciones inducidas por este proceso favorecen la acumulación de agua durante eventos de fuerte precipitación pluvial. El reconocimiento de las zonas de acumulación por medio de dichas simulaciones debe permitir la toma de decisiones concerniente al mantenimiento y construcción de obras hidráulicas.

En la primera parte de esta investigación se proporcionan generalidades sobre los tipos de simulación, los software utilizados frecuentemente como herramienta de trabajo y se dan ejemplos de aplicación en las geociencias. En la segunda parte se explica la problemática de los encharcamientos en la zona en estudio. Las características del MDT, el tratamiento de los datos de pluviometría para determinar volúmenes de agua y el algoritmo específico que se desarrolló en este trabajo se presentan en la tercera sección. Por último se propone una clasificación de las zonas de encharcamiento al considerar características tales como

área, volumen y profundidad asociadas también al hundimiento diferencial de la planicie lacustre de San Miguel Xico.

Las simulaciones y los Modelos Digitales del Terreno

La simulación es una metodología de análisis que permite la construcción de un modelo al considerar ciertos datos de entrada en un programa de computadora para describir el comportamiento de un sistema que apoye la toma de decisiones con base en los distintos escenarios posibles (Schmeiser, 1990); incluye tecnología y herramientas de software para entender y analizar problemáticas u oportunidades en relación con los sistemas simples y complejos. Existen dos tipos de simulaciones: la estratégica y la operacional; el primer tipo se emplea en sistemas complejos que requieren un análisis integral o interdisciplinario; el segundo tipo de simulación se aplica en la sistematización de procesos; tal es el caso de la manufactura de productos en la que la detección temprana de errores disminuye las pérdidas económicas (Parker *et al*., 2001, 2002).

En las geociencias, algunos ejemplos de la aplicación de las simulaciones y la modelación espacial son los trabajos en relación con las formas del relieve y su dinámica (Parrot, 2007), los peligros geológicos (Ochoa, 2009), el movimiento de placas tectónicas (Collet *et al*., 2000; Parrot y Collet, 2009), los derrames de petróleo (Parrot, 2009), la subsidencia e inundación (Freij-Ayoub *et al*., 2007), entre otros.

En el ámbito de la hidrología existe software para cálculos hidráulicos unidimensionales de ríos y canales tales como HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System, 2011) desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidráulica de la Armada de Estados Unidos; el programa MIKE-URBAN del Instituto de Hidrología Danés (DHI, 2011) simula inundaciones en zonas urbanas con la posibilidad de mostrar la extensión del flujo en modelos 2D independientemente de la resolución del MDT añadiendo también entradas sobre resistencia, turbulencia y parámetros de inundación y secado, los resultados se visualizan en series de tiempo, perfiles, mapas y animaciones. Otro software es el Sistema de Información Geográfica GRASS (Geographic Resources Analysis Support System, 2012) que a partir de un MDT genera rápidamente mapas de inundación o bien si se tiene un MDT de alta resolución es posible determinar las zonas de inundación aledañas a un río y su lámina calculada por medio de un modelo hidrodinámico de una dimensión. Para el software ArcGis (ESRI, 2010) existen varios algoritmos

para el tratamiento hidrológico y a través del programa Visual Basic es factible integrar módulos para simulación, ejemplo de ello es la extensión *FloodArea*.

Problemática en la zona en estudio

Los encharcamientos urbanos se producen cuando el flujo superficial y subterráneo del agua está limitado por la acumulación de basura en coladeras y drenajes; la pendiente e irregularidades del terreno favorecen el flujo o estancamiento. En el caso de la Ciudad de México, el hundimiento diferencial genera superficies de estancamiento, ejemplo de ello es la zona urbana de San Miguel Xico, al oriente del Nuevo Lago de Chalco, en el municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México (Figura 1) que corresponde con una de las zonas de mayor hun-

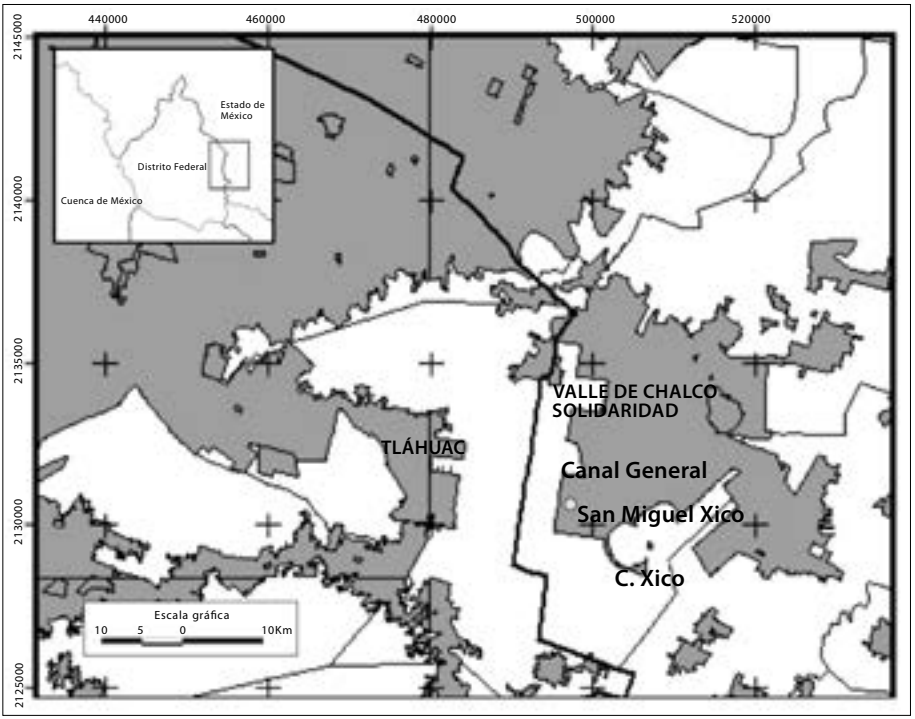


Figura 1. Zona urbana de San Miguel Xico, municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México.

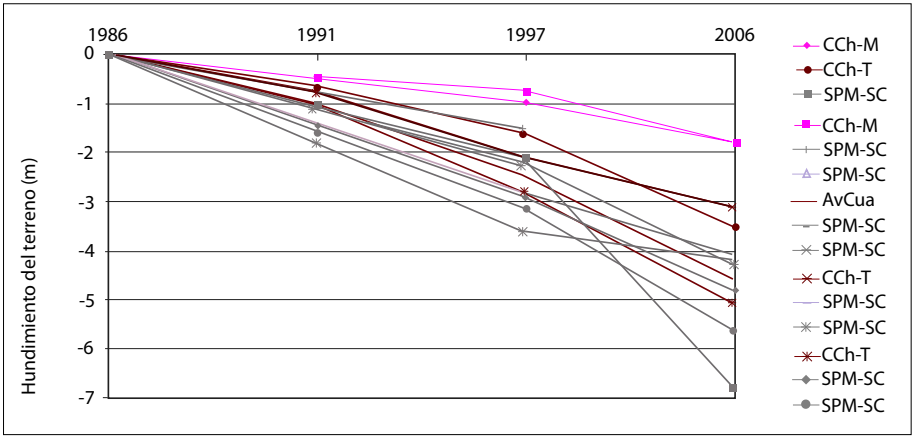


Figura 2. Puntos acotados de subsidencia en 1986, 1991, 1997 y 2006 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) obtenidos en la Carretera Chalco-Mixquic (CCh-M); Avenida Cuauhtémoc (AvCua); Carretera Chalco-Tláhuac (CCh-T) y el Sistema de Pozos Mixquic-Santa Catarina (SPM-SC), municipio de Valle de Chalco Solidaridad.

dimiento en la Cuenca de México debido a la extracción de agua para el abasto de la ciudad (Ortega *et al.,* 1999).

El monitoreo de precisión de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) en la zona muestra el hundimiento en algunos puntos de casi 7 m para el año 2006 (Figura 2). Con base en los datos de piezómetros ubicados en la planicie lacustre (NP2 y NP3) y el espesor del acuitardo superficial, Ortiz y Ortega (2010) elaboraron un modelo de subsidencia para 2020 y 2030, y consideraron que de continuar la taza de extracción actual, el hundimiento total en la zona será de entre 12 y 19 m en el 2020, del exterior al centro de la planicie, respectivamente, donde el acuitardo lacustre tiene un espesor promedio de 300 m, y para 2030 continuará la misma tendencia (Figura 3 y Tabla 1).

Metodología

La simulación de las superficies de acumulación requiere de un MDT de alta resolución, una lámina de agua y el desarrollo de un algoritmo. A continuación se detalla la obtención de cada uno de ellos.

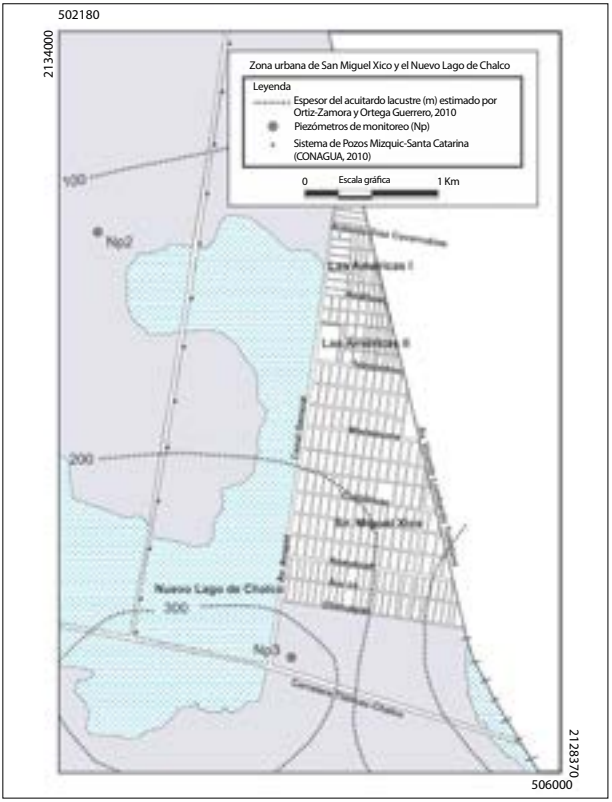


Figura 3. Ubicación de los piezómetros NP2 y NP3 utilizados en el modelo de subsidencia de Ortiz Zamora y Ortega Guerrero (2010).

Tabla 1. Subsidencia total acumulada en los sitios de monitoreo

Sitio/Año	Subsidencia total acumulada (m)		Tasa (m/año)
	2020	2030	
NP2	12	15	0.25
NP3	19	23	0.4

Fuente: Ortiz y Ortega, 2010.

a) MDT

El MDT de una zona esencialmente plana y con hundimientos diferenciales requiere de una mayor cantidad de información altitudinal, por lo que se obtuvieron puntos acotados mediante Sistemas de Posicionamiento Global de precisión. Las mediciones vectoriales se añadieron al área delimitada por las curvas de al-

titud < 2 300 msnm de INEGI (2006) originalmente interpoladas de manera multidireccional con el algoritmo *New-Miel* (Parrot *et al*., 1993; Parrot, 2004) con una resolución de 5 m; en el caso de los puntos acotados se realiza una dilatación (Taud *et al*., 1999), lo que permite destacar rasgos urbanos tales como el Canal General y su calle paralela (Calle Acapol) y la vía de ferrocarril México-Cuernavaca (Tabla 2).

b) Cálculo de lámina

La extracción de las zonas de encharcamiento requiere de un análisis previo del comportamiento de la lluvia para determinar la cantidad de agua que se distribuirá en el MDT. La temporada de lluvia de la subcuenca Chalco se presenta durante los meses de mayo a octubre, esto por el gran aporte de humedad que llega al continente proveniente de los ciclones tropicales de los océanos Pacífico y Atlántico; y una menor cantidad ocurre durante la temporada seca del año, si bien este comportamiento es estacional, los eventos que han generado inundaciones severas en la zona no han ocurrido solamente durante la temporada de lluvias. Para determinar el comportamiento de la precipitación pluvial se utilizó el Exponente de Hurst (H), el cual mide la aleatoriedad o persistencia de un fenómeno (Hurst, 1951). En este caso, el exponente de Hurst obtenido del análisis de la serie de datos de precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco (1961-2008), (SMN, 2010; Figura 4), (H=0.271) indica la irregularidad del fenómeno por lo que el desencadenamiento de inundaciones también es aleatorio.

El volumen de agua como dato de entrada para la generación de encharcamientos se obtuvo con base en un análisis de frecuencia (Osman y Houghtalen, 2003) que utiliza la distribución de probabilidad de Gumbel, misma que se ajusta a la mayoría de los datos de precipitación. La cantidad de precipitación máxima esperada en 24 hr en un periodo de retorno de cinco años es de 49 mm en tanto

Tabla 2. Valores de altitud máxima y mínima medidos en diferentes sitios de la zona de San Miguel Xico, municipio Valle de Chalco Solidaridad

Zona de medición	Altitud (msnm)	
	mín.	máx.
Canal General	2 227.21	2 228.55
Calle Acapol	2 224.55	2 228.96
Ferrocarril Cuernavaca-México	2 227.003	2 229.26
Calles	2 226.87	2 228.91

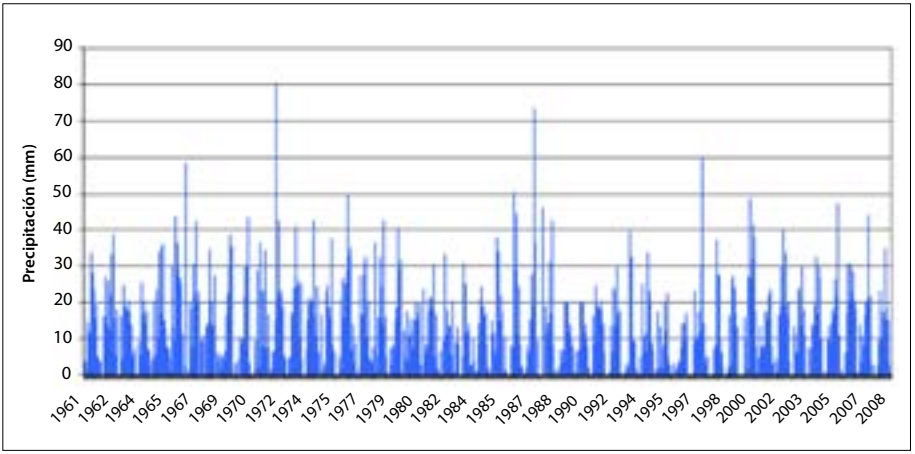


Figura 4. Precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco durante el periodo 1961-2008 (fuente: SMN, 2010).

que para diez años es de 58 mm; por otra parte, la máxima cantidad de precipitación estimada para un periodo de retorno de un siglo (88 mm) es cercana a la ya registrada en la estación climática Chalco con 80 mm. El volumen de agua utilizado en las simulaciones corresponde al de 49 y 88 mm, respectivamente.

c) Descripción del algoritmo

Las zonas de encharcamiento se obtuvieron mediante el desarrollo del algoritmo *Charcos* (Parrot, 2010). En el primer cálculo se ubica el punto de altitud más baja (P_b) en la zona urbana delimitada por una máscara; en este punto inicial se define un primer código junto con el llenado de una lámina de agua (L_x); se atribuye el mismo código a los píxeles vecinos cuando la altitud es menor que la superficie de la lámina. El siguiente fondo de una zona de encharcamiento iniciará cuando la altitud sea igual a la del nivel alcanzado por la superposición de láminas del punto anterior; en este caso el código de la nueva depresión es igual al código anterior más uno. El llenado continúa y el valor de los píxeles vecinos dependerá de la conexión anterior hasta encontrar el límite entre dos zonas de encharcamiento con códigos (Figura 5a). Una vez que se han delimitado todas las zonas de encharcamiento se distribuye el volumen más frecuente (en 24 hr) determinado para cinco años y un siglo, esto es 49 y 88 mm, ya que el primer caso corresponde con las zonas de encharcamiento más frecuentes y el segundo, con la extensión máxima de éstas en eventos de precipitación muy fuerte (Figura 5b).

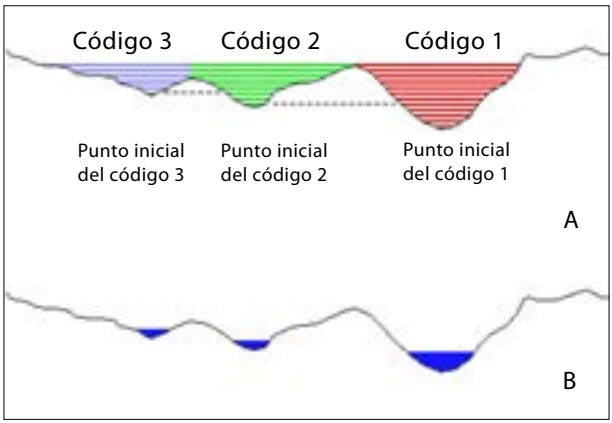


Figura 5. Llenado progresivo del algoritmo *Charcos* a. primera etapa: búsqueda del punto más bajo y b. segunda etapa: cálculo de la profundidad según el área de cada depresión.

Los resultados de cada tratamiento son tres imágenes y un archivo descriptivo, la primer imagen muestra las depresiones delimitadas en la zona urbana (*imagen_charc.raw*), la segunda indica los charcos en cada una de ellas (*imagen_charc_code.raw*) y la tercera corresponde al MDT con la altitud del terreno añadiendo la codificación de la profundidad (*imagen_charc_prof_m4*). El archivo descriptivo contiene el número de depresiones y su área (m^2), el volumen de agua (m^3) captado en relación con la cantidad de precipitación pluvial (mm o l/m^2) y la profundidad máxima (cm) de la lámina de agua en cada depresión.

Resultados

El algoritmo detecta 102 depresiones en la zona urbana de San Miguel Xico; las depresiones con el fondo de menor altitud se distribuyen en forma paralela al Canal General y corresponden con el área de mayor hundimiento regional estimado por Ortiz y Ortega (2010). Las zonas de encharcamiento con una precipitación de 49 mm alcanzan láminas de 15 cm, y de 19 cm cuando la precipitación es de 88 mm en un periodo de 24 hr. La mayor parte de las depresiones tienen una superficie menor a los 100 000 m^2 con láminas <10 cm, en tanto que las depresiones con una superficie >100 000 m^2 son muy pocas y registran láminas de entre 2 y 19 cm (Figura 6).

La mayoría de las zonas de encharcamiento son de poca profundidad pero su volumen y superficie varía (Figura 7). A través del Análisis de *Cluster* es posible determinar grupos de objetos internamente homogéneos y lo más heterogéneo al

Figura 6. Resultados de la simulación con el algoritmo *Charcos* que muestra (a) las zonas de encharcamiento (rojo) y (b) las depresiones definidas en función de la altitud del fondo (matiz de azul).

exterior, considerando distintas variables sin la necesidad de una independiente o explicativa (Everitt *et al.,* 2001). Existen varias distancias para determinar la similitud de los objetos, la más utilizada es la euclidiana, pero también se pueden usar otras técnicas de análisis que construyen grupos por agregación, como el algoritmo de clasificación ascendente (Johnson, 1967) en el que la agrupación es de forma secuencial, de menor a mayor distancia. Para representar gráficamente

el grupo se emplea el gráfico en forma de árbol o dendograma donde cada objeto está representado inicialmente por una rama final, las uniones de ramas del árbol en otras intermedias representan las distancias a las que se produce el agrupamiento.

Al considerar la superficie, el volumen y la profundidad de la lámina de agua en cada charco por una precipitación máxima de 49 y 88 mm en 24 hr se obtienen tres tipos de encharcamientos de igual superficie promedio para ambas cantidades de lluvia pero con mayor volumen y profundidad (Tablas 3 y 4). El primer grupo de charcos se encuentra en forma paralela al Canal General, y corresponde con la zona de mayor subsidencia, su lámina promedio es de 11 cm; los charcos del segundo grupo ocupan una mayor superficie y volumen de agua

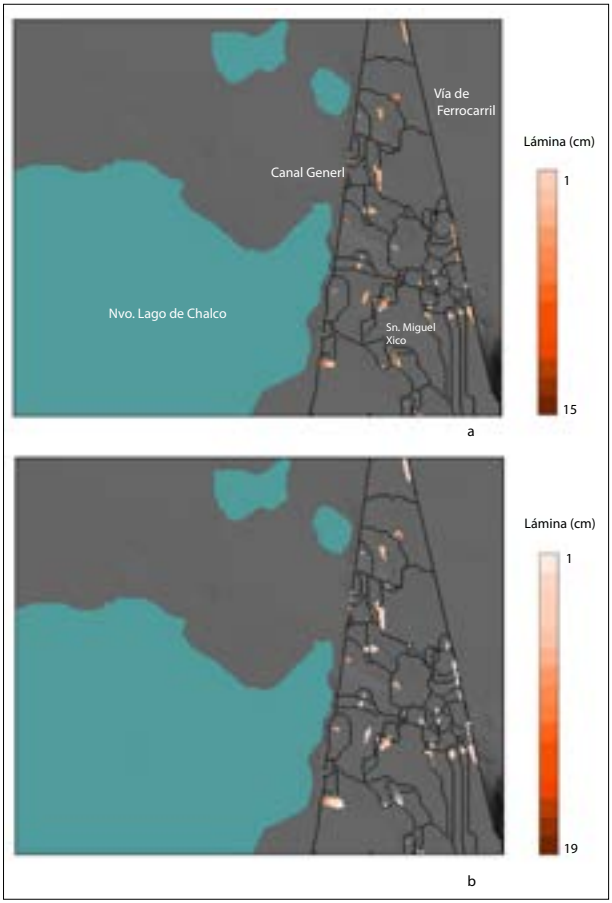


Figura 7. Profundidad de la lámina de agua en cada depresión para una precipitación pluvial de 49 y 88 mm (b y d, respectivamente).

Tabla 3. Valores medios por grupo de charcos con una precipitación máxima de 49 mm en 24 hr

Valores medios por grupo	Superficie (m^2)	Volumen (m^3)	Profundidad (cm)
1	178433	8922	11
2	343100	17155	7.4
3	17326	866	1.2

Tabla 4. Valores medios por grupo de charcos con una precipitación máxima de 88 mm en 24 hr

Valores medios por grupo	Superficie (m^2)	Volumen (m^3)	Profundidad (cm)
1	178 433	14 275	13.5
2	343 100	27 448	8.7
3	17 326	1 386	1.6

que el primer y tercer grupo de charcos; no obstante, la profundidad promedio es menor que los charcos del primer grupo y se encuentran con mayor frecuencia en la zona urbana; el último grupo de charcos se caracteriza por su baja profundidad por lo que el volumen de agua y superficie son menores.

Si bien existe una relación directa entre la superficie y el volumen de los encharcamientos para cualquier cantidad de precipitación pluvial, la profundidad o lámina y el volumen de agua en los mismos se relacionan con la morfología del terreno (Figura 8, 9 y 10); esto implica que en eventos de precipitación pluvial de 49 mm, las zonas de encharcamiento tendrán láminas menores cuyo volumen se distribuirá en superficies irregulares del terreno; en cambio, durante los eventos

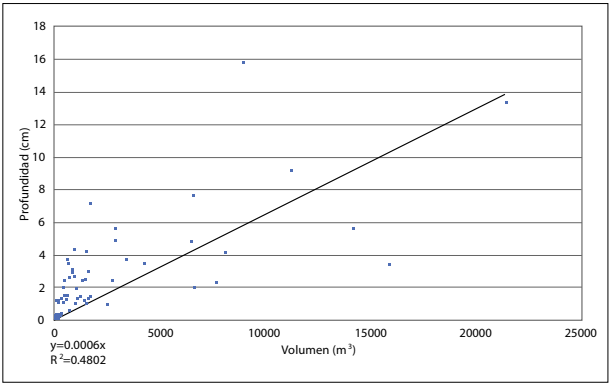


Figura 8. Relación entre la profundidad con el volumen de las zonas de encharcamiento con 88 mm de lluvia.

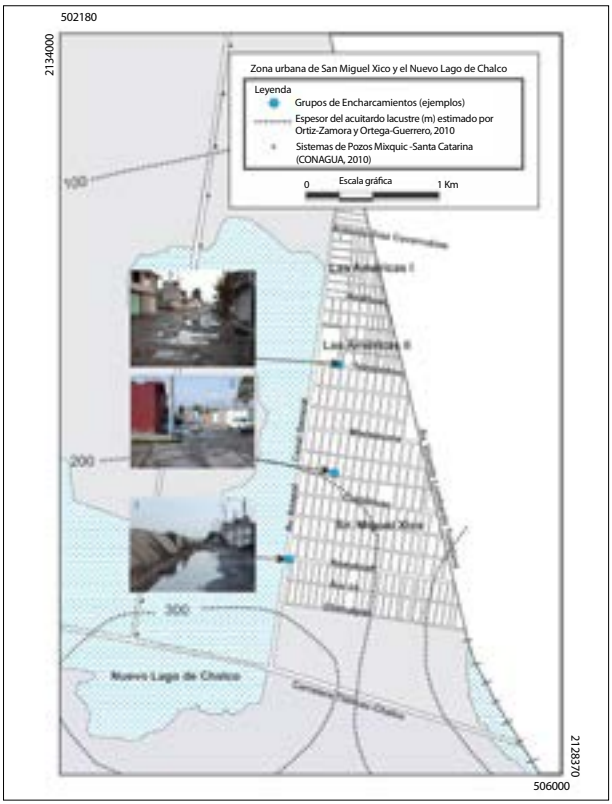


Figura 9. Grupos de charcos (1, 2 y 3) clasificados con el algoritmo de *Johnson*.

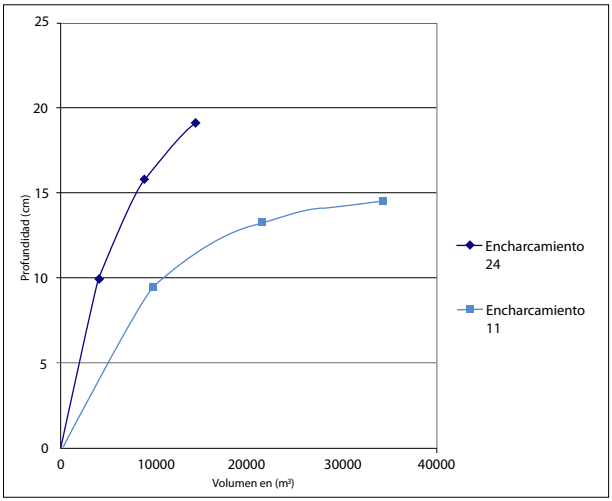


Figura 10. Relación entre el volumen y la profundidad de las ¿?? de dos zonas de encharcamiento considerando la misma cantidad de precipitación pluvial.

de fuerte precipitación pluvial, los encharcamientos de mayor altura se encontrarán en un terreno más profundo, asociado con la subsidencia ubicada al sur del Canal General.

Conclusiones

La simulación mediante MDT es una técnica de investigación necesaria en las ciencias ambientales dada la capacidad de respuesta; presenta ventajas de experimentación, costos, seguridad y visualización espacial. Las zonas de encharcamiento indican áreas de atención para obras públicas de pavimentación y monitoreo del hundimiento; sin embargo, para mejorar su delimitación se requieren nivelaciones de precisión con una mayor densidad de puntos que incluyan la infraestructura hidráulica. Esta técnica de análisis podría implementarse no solo en la simulación, sino en el monitoreo en tiempo real de los encharcamientos durante la temporada de lluvias y su información oportuna a la población para tomar alternativas viales o bien disminuir el daño en inmuebles.

Capítulo 8. Reconstitución tridimensional de un paleo-relieve. Aplicación al estudio del talud gravitacional "La Galera" en el municipio de Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla, México

Verónica Ochoa Tejeda
SERTIT Service Régional de Traitement d'image et de Télédétection,
Universidad de Estrasburgo, Francia

Introducción

Los acercamientos cuantitativos de la geomorfología o geomorfometría han sido tratados y experimentados desde hace mucho tiempo, pero el desarrollo de la teledetección espacial reforzó el interés que se le daba antes. Actualmente, ambas son puestas en práctica sobre todo para describir las modificaciones topográficas debidas a la tectónica reciente o activa. En las regiones donde la tectónica es importante, la geomorfometría y la teledetección sirven para comparar y evaluar las tasas de crecimiento de los relieves que corresponden a rasgos estructurales.

La geomorfometría se apoya sobre un conocimiento preciso de la topografía terrestre gracias a información satelital o a mapas topográficos (curvas de nivel digitales) para obtener modelos digitales de elevación (MDE), los cuales permiten una automatización de los cálculos y el desarrollo de nuevos parámetros.

El uso de los MDE cada vez es más recurrente y extendido, ya que se pueden utilizar en diferentes tipos de investigaciones, como en la detección de fallas geológicas, la exploración geotérmica, la extracción de la red fluvial, en los cálculos de insolación, para hacer simulaciones y reconstrucciones del paisaje, entre otros. Con la ayuda del tratamiento digital de imágenes de satélite a diferentes resoluciones (Landsat, Spot, IKONOS, etc.), y el análisis estereoscópico de pares de fotos, los tratamientos de estos datos numéricos conducen a una visión 3D del relieve (Casana y Cotheren, 2008; Parrot y Ochoa, 2008; Philip *et al*., 2002), además de que se pueden generar MDE de alta precisión y resolución.

Se pretende mostrar en este capítulo el aporte de las simulaciones tridimensionales en el estudio de los procesos morfogenéticos (erosión, transporte y sedimentación), así como en el estudio del modelado de la superficie terrestre en el tiempo. De hecho, el desarrollo de las simulaciones representa un importante acercamiento que permite analizar de manera objetiva cualquier fenómeno y así poder validar una hipótesis concerniente a cada evento.

En las páginas siguientes se estudia y se analiza un proceso de remoción en masa (PRM) a partir de la reconstitución tridimensional del paleo-relieve. Este movimiento en masa se produjo en una ladera de la formación Tamán-Pimienta del Jurásico Superior de la región de La Soledad, Sierra Norte de Puebla (México) y generó el talud gravitacional de "La Galera", depósito inestable frecuentemente removilizado por deslizamientos, sobre todo cuando se presentan lluvias extraordinarias relacionadas con la presencia de huracanes y depresiones tropicales que afectan a México.

Antes de desarrollar los aspectos metodológicos y los resultados obtenidos, se necesita dar una breve descripción de la región en estudio, de las formaciones geológicas superficiales y taludes gravitacionales. En particular, se dan las características del talud gravitacional "La Galera", los detalles y el tipo del PRM que lo formó. Asimismo se presenta una pequeña explicación de cómo se generó el MDE, de los tratamientos que se hicieron para elegir la resolución o tamaño del píxel acorde para hacer la reconstitución del talud. Posteriormente se dan las bases del algoritmo y finalmente se calcula el volumen del material del deslizamiento: el desplazado, el acumulado y el erosionado.

Localización

El talud gravitacional "La Galera" se localiza en la vertiente noroeste de la región de La Soledad en el municipio de Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla, México. La zona de La Soledad queda comprendida entre las provincias fisiográficas Sierra Madre Oriental y el límite norte de la porción oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano. La región se localiza entre las coordenadas 19°53' y 20°00' de latitud N y las coordenadas 97°25' y 97°32' de longitud W (Figura 1).

Figura 1. Localización del talud gravitacional La Galera.

Formaciones geológicas superficiales

A lo largo de la historia geológica han existido numerosas causas naturales que han provocado el desencadenamiento de los procesos de remoción en masa, como han sido los sismos, erupciones volcánicas, desplomes de los techos de las cavernas, laderas montañosas abruptas asociadas a fallas, precipitaciones extraordinarias, etc. Los PRM han movilizado grandes cantidades de material geológico y éstos son responsables de la formación de importantes depósitos gravitacionales, también conocidos como depósitos inestables o formaciones geológicas superficiales.

Los depósitos inestables o formaciones geológicas superficiales, así llamadas por los geólogos y los geomorfólogos, están constituidos por materiales que provienen de la transformación física de la roca existente (fragmentación, alteración…) o que resultan de un transporte y de una larga evolución físico-química (antiguos depósitos eólicos, blindaje laterítico, etc.). La distribución de estos depósitos en el espacio está estrechamente vinculada a las formas del relieve (Richard y Beroutchachvili, 1996). Las formaciones superficiales representan los

materiales no consolidados que se encuentran sobre las rocas *in situ* y consisten en una corteza de intemperismo y depósitos de ladera, fluviales y otros.

La clasificación de las formaciones geológicas superficiales según Dewolf y Bourrié (2008), se basa principalmente en la topografía y la dinámica en la cual éstas se han sometido; básicamente se toma en cuenta su naturaleza y su comportamiento. Así se tienen:

a) las formaciones autóctonas son todas las formaciones esenciales para la reconstrucción de paleo ambientes (regolitas, alteritas, arcillas sobre kars, organitas);
b) las sub-autóctonas son las formaciones de vertientes (coluviones, taludes gravitacionales);
c) las alóctonas son las formaciones que tienen un vínculo con la dinámica y el proceso en acción (fluvial, glacial, litoral, lacustre, eólico) y generan formas características como las terrazas fluviales, morrenas, dunas de los desiertos y litorales, mesetas eólicas;
d) las formaciones superficiales consolidadas (compactación y consolidación por los carbonatos, cortezas salinas, silicificaciones y blindajes lateríticos) cuya presencia desempeña un papel esencial en los paisajes morfológicos.

Y por último,

a) las formaciones superficiales llamadas "antrópicas", es decir, las que son alteradas o generadas por el humano como los terraplenes o rellenos y los jales mineros.

Talud o depósito gravitacional

En la Sierra Norte de Puebla se definen dos tipos principales de formaciones geológicas superficiales: coluviones y taludes o depósitos gravitacionales (Ochoa, 2009, 2010). En este capítulo solo se hace mención del segundo tipo, y en particular se estudia el talud gravitacional de "La Galera" como ejemplo para la reconstrucción de un paleo-relieve.

El talud gravitacional está clasificado dentro de las formaciones geológicas superficiales del tipo sub-autóctonas; es una superficie inclinada con una acumulación de detritos rocosos al pie de un acantilado o de una pendiente fuerte; el

talud se origina por movimientos masivos de material rocoso de diferente granulometría (detritos, brechas, derrubios), en donde el agente principal es la gravedad y que se mueven por la ladera, valle abajo formando lóbulos o conos como expresión geomorfológica. El talud tiene un ángulo natural de reposo que es aquél en el cual el material se encuentra en equilibrio (Lugo, 1989; Barsch, 1996). Dicho ángulo depende de la granulometría homogénea de los sedimentos que lo forman. Pero cuando la granulometría de los materiales es heterogénea y mal clasificada como en los procesos de remoción en masa, no hay ángulo de reposo.

Los taludes gravitacionales pueden ser activos o inactivos; los activos se caracterizan por un escarpe frontal marcado, mientras que las formas inactivas presentan transición convexa suave entre superficie y la vertiente frontal.

Los taludes gravitacionales inactivos todavía conservan su material pero han dejado de moverse. Esto se debe a causas climáticas, hidrológicas o geomorfológicas. El relieve superficial de un talud gravitacional inactivo todavía está bastante bien conservado. Los "paleo-taludes gravitacionales", en contraste, ya están decaídos debido a la erosión o intemperismo, hay pérdida del material de la matriz (partículas más finas), su superficie puede presentar elevaciones débiles remanentes de las estructuras de flujo (Brenning, 2003).

En términos generales el tamaño de los taludes gravitacionales en la región de La Soledad varía entre los 400 a 1 500 m de ancho y 300 a 2 000 m de largo; los más grandes se han originado esencialmente al pie de los acantilados de las formaciones del Jurasico Inferior (Huayacocotla) y Superior (Tamán y Pimienta); en su superficie se desarrollan ondulaciones y lóbulos característicos producidos por el flujo; además es fácil reconocer un talud gravitacional por su escarpe frontal convexo. Según el origen del material los taludes gravitacionales están formados principalmente por el material de la vertiente.

Talud gravitacional "La Galera"

El talud gravitacional "La Galera" se formó a partir de un proceso de remoción en masa complejo, el cual se inició a partir de un colapso relacionado con la formación de la Caldera de los Humeros en la vertiente de la formación Tamán-Pimienta (JS; Figura 2); la caída de un volumen importante de bloques provenientes del acantilado dio lugar a un deslizamiento rotacional de rocas, el cual movilizó el material entre una cicatriz semicircular y el antiguo espejo de la falla normal, consecuente también de la formación de la gigantesca caldera de Los Húmeros (Mooser, 1972; Verma, 1983), cuyo centro se ubica a 30 km al sur. El material desplazado por el deslizamiento formó un enorme lóbulo originando el talud de escombros de gran amplitud como expresión del relieve.

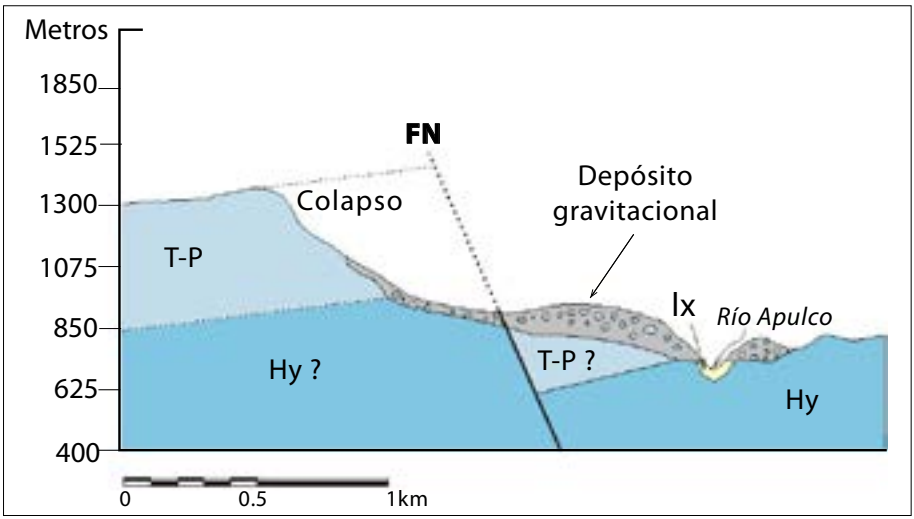


Figura 2. Corte esquemático del colapso afectando la formación del Jurásico Superior en la región de La Galera y de la formación del depósito gravitacional resultante. T-P = Formación Tamán y Pimienta (Jurasico Superior); Hy = Formación Huayacocotla (Jurásico Inferior); FN = Falla normal.

Cabe añadir que toda la vertiente norte en donde se encuentra la presa La Soledad en el municipio de Tlatlauquitepec, corresponde al límite septentrional de la influencia de la caldera y que su formación indujo numerosos colapsos en esta zona y en la fase final provocó grandes derrames de material de tobas y de ignimbritas.

El talud gravitacional "La Galera" es un depósito activo, cuyo material constituido principalmente de calizas, lutitas, margas y areniscas, fue removilizado por numerosos deslizamientos rotacionales que se desencadenaron a causa de las fuertes precipitaciones originadas en 1999 y 2005. Este fenómeno es el responsable de la formación de importantes depósitos de brechas gravitacionales actuales.

Los deslizamientos

Se denomina deslizamiento al movimiento lento o rápido de una masa de suelo o de rocas en una ladera de más de 15° de inclinación, plano sobre el cual se resbala. Sus dimensiones son muy variables, pueden ser de unas decenas a cientos de miles de metros cúbicos de roca; en espesor varían de menos de un metro a más

de veinte. Se desencadenan principalmente en las montañas, riberas de ríos, lagos y mares. Al producirse un deslizamiento se origina una grieta de forma cóncava vista en plano, en la zona de ruptura, con un escarpe que presenta el movimiento vertical entre las masas. En la grieta puede desarrollarse un circo de erosión. La masa deslizante presenta, por lo general, una superficie escalonada (Lugo, 1989). La presencia de grietas es la primera señal de la posibilidad de que se genere un proceso de este tipo, éstas se llegan a localizar en la zona que ocupara el escarpe principal.

Los deslizamientos se subdividen en tres tipos: rotacional, translacional y planar, y la superficie de ruptura define al tipo. En este capítulo solo se menciona el tipo rotacional, ya que fue el proceso que originó el talud gravitacional "La Galera".

Los deslizamientos rotacionales

Según Hutchinson (1988), los deslizamientos rotacionales son movimientos de masa esencialmente vinculados a fuerzas que causan un desplazamiento curvo alrededor de un punto situado sobre el centro de gravedad de la unidad desplazada.

El deslizamiento rotacional se caracteriza por superficies de ruptura cóncavas o curvas; los materiales o la masa desplazada se acumulan ladera abajo y su grado de deformación suele ser muy bajo. Los movimientos posteriores al inicial pueden ocasionar el retroceso progresivo de la corona, la extensión y velocidad; puede ser muy variable según el tipo de material en el que se originen. Los deslizamientos rotacionales se dividen en dos grupos: los que afectan las capas geológicas y los que afectan las formaciones geológicas superficiales.

a) Deslizamientos que afectan las capas geológicas

Éstos pueden producirse a contra buzamiento (sentido contrario de la inclinación de las capas geológicas), en donde la extensión del material desplazado es menor y se generan solamente lóbulos poco extensos. Afectan sobre todo las rocas poco compactas y muy foliadas (rocas metamórficas) o estratificadas (rocas sedimentarias) y que contienen una fuerte proporción de niveles ricos en arcilla (Figura 3A). Por otro lado, en el caso de los deslizamientos que van en el sentido del buzamiento, la extensión del material desplazado es mayor e implica la formación de lóbulos muy anchos (Figura 3B).

b) Deslizamientos rotacionales que afectan las formaciones geológicas superficiales

En el caso de los deslizamientos rotacionales que afectan las formaciones superficiales más o menos homogéneas de gran espesor y con gran saturación de agua, la corona de desprendimiento está en el arco del círculo y la superficie de ruptura

es una curva bien definida (la concavidad se dirige hacia lo alto) y presenta una fuerte circularidad (Figura 3C). Cuando la formación superficial reposa sobre el sustrato, la superficie de ruptura embona entonces con la topografía del basamento, sobre todo cuando ésta es impermeable (Figura 3D).

El deslizamiento rotacional que formó el talud gravitacional La Galera, es del tipo A (Figura 4), es decir, que afectó las capas geológicas casi horizontales a contra buzamiento de 5°, los escombros se deslizaron rápidamente hasta el cause del río Apulco encontrando su equilibrio.

Morfología de un deslizamiento rotacional

Crozier (1973) propone aplicar a los deslizamientos rotacionales diversos índices morfométricos describiendo la forma (Figura 4). De hecho, la clasificación dada por este autor en 1986 se apoya sobre las formas del deslizamiento, la masa trasladada, la cicatriz y la superficie de ruptura, permitiendo así distinguir seis índices morfométricos tales como la profundidad, la dilatación, etc. Fue posible tomar en cuenta estos índices para validar los resultados obtenidos en la reconstitución del paleo relieve. Esta simulación concerniente a los movimientos antiguos de terreno que han afectado la formación Tamán-Pimienta, se hizo a partir de un modelo digital de elevación.

Reconstitución del talud gravitacional

Se han desarrollado diferentes índices morfométricos que permiten abordar de manera cuantitativa el estudio del relieve como: *a)* índices sobre la importancia del relieve y su grado de disección por la erosión; *b)* índices a partir de los cursos de agua; *c)* índice de sinuosidad de los frentes montañosos, y *d)* combinación de la utilización de diferentes índices.

También existen métodos para determinar el volumen de un deslizamiento, por ejemplo, se puede hacer una estimación directamente de los datos del terreno. Alternativamente, a la escala de la cuenca, los modelos digitales de elevación son herramientas útiles, pero requieren de una buena resolución espacial (Korup, 2005).

De la metodología propuesta por Ineter-COSUDE (2003-2005), para el cálculo del volumen se tiene la fórmula: $V = (\pi)\ (Wr.\ Lr.\ Dr.)/6$; donde, V: Volumen de material (m^3); Wr es el ancho de la superficie de ruptura; Lr la longitud

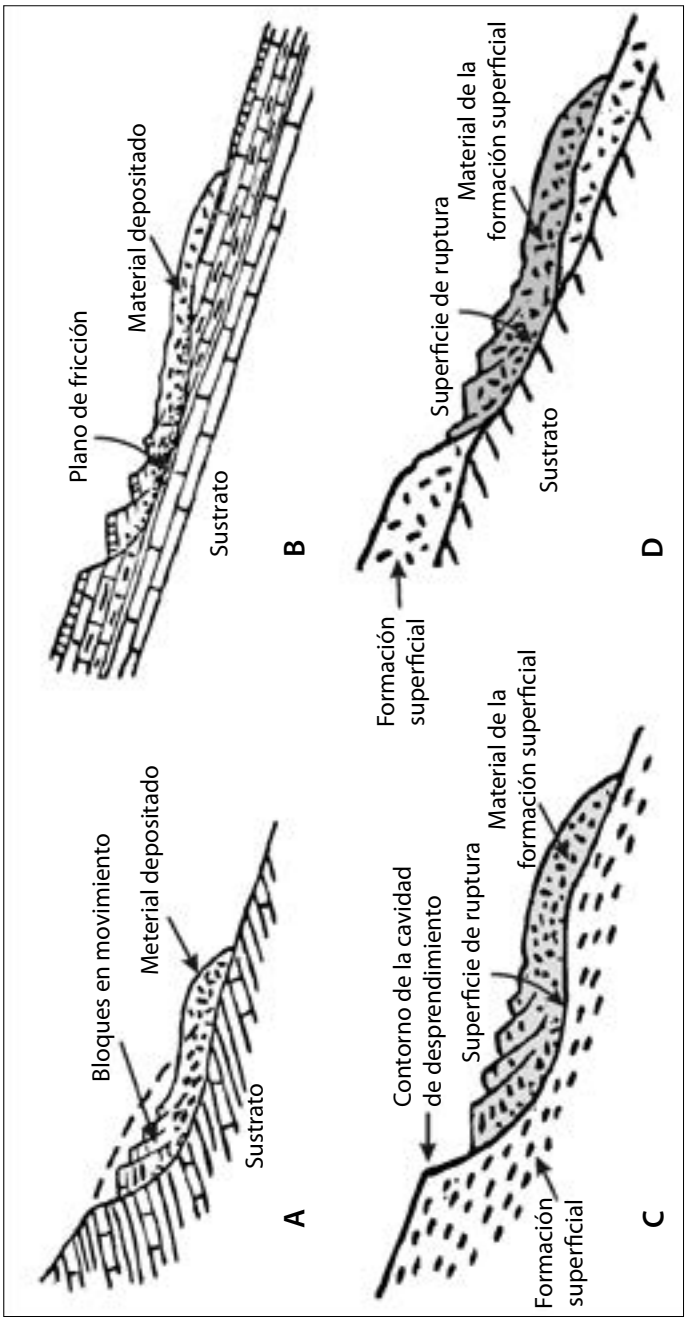


Figura 3. Esquemas de deslizamientos rotacionales. A. Afectando el sustrato en contra buzamiento y B. En sentido del buzamiento; C-D. Afectando las formaciones superficiales.

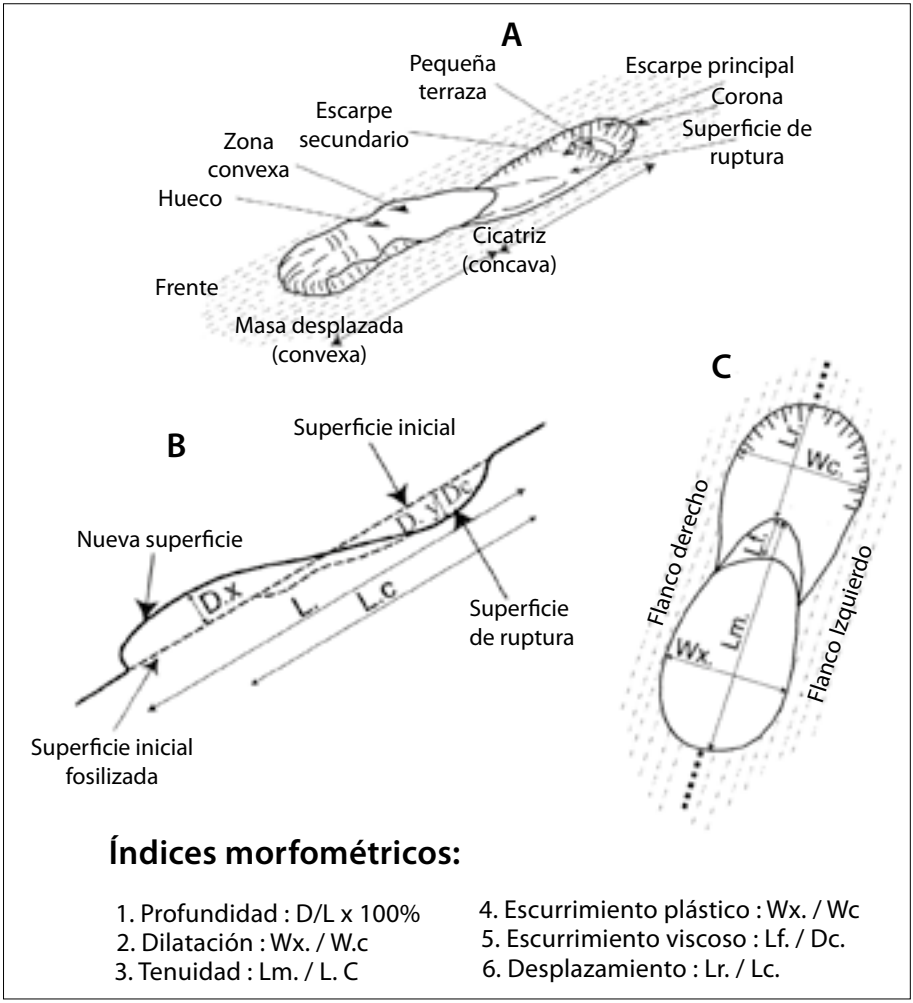


Figura 4. Índices morfométricos utilizados para el estudio de movimientos de terreno; aplicación a las lupas del deslizamiento (Crozier, 1973).

de la superficie de ruptura; Dr la profundidad de la superficie de ruptura, mediante perpendicular a la topografía original del terreno y $\pi = 3.1416$. Este modelo descrito para calcular el volumen de material movilizado contempla también el factor de hinchamiento del material.

En este trabajo se propone una simulación sobre la zona de dicho talud gravitacional, con el fin de estimar el volumen del material desplazado en la

zona cóncava de desprendimiento y el material acumulado en la zona convexa del lóbulo, constituido por materiales poco consolidados (detritos) e inestables.

El algoritmo propuesto *Simdesl_v3.exe* (Parrot, 2009 inédito) reconstituye la forma anterior del relieve antes del evento, lo que permite así calcular por la diferencia entre el MDE generado por la simulación y el MDE original, el volumen puesto en movimiento por el fenómeno y el volumen depositado en el frente (lóbulo) del deslizamiento.

Se puede ver que la simulación de este talud gravitacional obedece al comportamiento teórico propuesto por Crozier (1973) para medir los elementos morfométricos de un movimiento de ladera, el cual, se mencionó anteriormente.

Antes de explicar cómo funciona el algoritmo, se da una explicación sobre la generación y el tipo de modelo digital de elevación (MDE) y el porqué se eligió la resolución de 5 m el tamaño del píxel en el MDE empleado. Éste se generó siguiendo el proceso descrito en el manual "Generación de MDE raster. Método de Digitalización" (Parrot y Ochoa, 2005), donde se explica un método para generar MDE, a partir de las curvas de nivel provenientes de mapas topográficos barridos (escaneados).

Una vez dibujadas todas las curvas de nivel (Ochoa, 2004) de los mapas topográficos escala 1:50 000 (Cartas Teziutlán, INEGI 1999, 2006), las imágenes se guardaron en el formato *.raw* como lo requiere el algoritmo empleado para generar el MDE. Estos programas necesitan un archivo de formato *.txt* que corresponde al archivo descriptivo de la imagen *.raw*.

Se necesita también crear una tabla de correspondencia entre los valores en tonos de gris de las curvas de nivel y los valores de altitud porque el programa Brod4_mx.exe (Parrot, 2003) utiliza esta tabla y la imagen de las curvas dibujadas, para crear un archivo en 4 bytes de las curvas de nivel con sus valores reales de altitud. El programa Brod4_mx.exe va a crear una imagen que tiene la extensión _c4.raw donde el valor de altitud de las curvas de nivel se definió en decímetros. Este archivo es la base sobre la cual se hacen las interpolaciones multi-direccionales

Tomando en cuenta esta tabla de correspondencia, el programa *Brod4_mx.exe* va a crear una imagen que tiene la extensión _c4.raw. Este archivo, es la base sobre la cual se hacen las interpolaciones multi-direccionales.

Finalmente, con el programa *miel4_mx.exe* (Parrot, 2003) se genera el MDE (creando un archivo con extensión *_m4.raw*) a partir de la imagen con extensión *_c4.raw*, haciendo una interpolación multidireccional. Estas dos imágenes están codificadas en cuatro bytes (int).

Este formato asegura cualquier diferencia de isometría con un tamaño del píxel que se mide en metros, decímetros o centímetros[9] (a veces en milímetros) y finalmente se crea un MDE de cuatro bytes. El algoritmo *miel4_mx.exe* trabaja por capas comprendidas entre dos curvas de nivel. Las capas corresponden a zonas cerradas y delimitadas dentro de la imagen. Por cada píxel ubicado en la capa se mide el valor de la distancia mínima (d_i) entre este punto y la curva inferior de altitud A_i y su distancia mínima (d_s) con la curva superior de altitud A_s (Figura 5).

El valor de la altitud A_p del *píxel* P de coordenada (i,,j) es igual a:

$$A_p = A_i + [(A_s - A_i) \times (d_i / d)] \text{ donde } d = d_i + d_s.$$

Por otro lado se añaden puntos cotejados en las curvas cerradas para evitar que se generen zonas planas; la interpolación dentro de las curvas cerradas siguen el proceso desarrollado por Taud *et al.* (1999). Cabe decir que en el programa *miel4_mx.exe* las zonas planas desaparecen porque este algoritmo hace una interpolación en las zonas que están ubicadas entre dos curvas de altitud diferente, buscando las distancias mínimas que unen un punto en estudio y estas dos curvas. Finalmente se crean dos MDE de 2 y 4 bytes con precisiones isométricas, ya sean en metros, decímetros, centímetros o milímetros, y con diferentes resoluciones del tamaño del píxel. Esto se elige según el uso y lo que se quiere extraer del MDE.

Para decidir cuál era la resolución del MDE adecuada para hacer la reconstitución del talud gravitacional, se hicieron algunos tratamientos con las imágenes IKONOS del año 2000 (después del evento) como la aplicación de los índices de reflectancia (NDVI, SBI), el análisis de los PRM con la ayuda de los patrones de reconocimiento de formas para extraer las trazas de los deslizamientos (Parrot y Ochoa, 2008), así como también se redimensionaron las imágenes de satélite originales, es decir, la imagen original pancromática que tenía 1 m y la multiespectral 4 m de resolución, se recalcularon obteniendo imágenes de 5 m tamaño de píxel. Esto mismo se hizo con el MDE, se redimensionó el original de 25 m a 20, 10 y 5 m. Estas imágenes resultantes permitieron generar diferentes imágenes de pares estereoscópicos con diferentes valores de resolución. Después, estos

[9] Si se trabaja en zonas con altitudes menores a 6.5 km y con píxeles decimétricos se requiere solamente un formato de 2 bytes. La versión del programa *Newmiel.exe* (Parrot y Taud, 1993) permite generar MDE de 16 bits con extensión _m2.raw. Lo hace a partir de una imagen de las curvas de nivel de 32 bits, con extensión _c2.raw, generada por el programa *Brod_tab.exe* (Parrot, 1992).

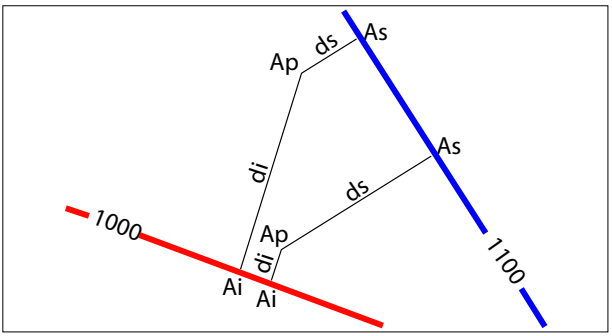


Figura 5. Ejemplo del cálculo de la interpolación lineal entre dos curvas de nivel 1000 y 1100.

pares estereoscópicos se transformaron a pares de imágenes epipolares[10] normalizadas las cuales son paralelas al plano XY del espacio objeto. Al transformar las imágenes adquiridas en epipolares se produce exclusivamente el paralaje en una sola dirección y los puntos correspondientes se alinean en la misma fila o columna, por lo que el tiempo requerido para realizar el proceso de superposición de las imágenes, que permitirá luego el cálculo de la magnitud de la paralaje y con base en ella la elevación se reduce considerablemente. La normalización del par estereoscópico adquirido se realiza comúnmente aplicando criterios de geometría epipolar (Morgan, 2004), el proceso se resume en lo siguiente (Figura 6).

Si m es la proyección sobre una imagen de un punto M visto por un captador en posición C1, el punto que le corresponde sobre la otra imagen, cuando el captador está en posición C2, pertenece forzosamente a la derecha llamada línea epipolar. La relación entre m y esta misma a la derecha está definida por la "matriz fundamental". Las líneas epipolares son las trazas del plano epipolar (C1, C2, M) sobre cada imagen.

Cuando el punto M se mueve, los puntos e1 y e2 quedan fijos. Son los epipolos. El hecho de que un punto en el suelo y los dos centros ópticos pertenezcan al plano epipolar implica que para un punto dado sobre una imagen, el punto que le corresponde sobre la otra imagen pertenece a la línea epipolar, y por tanto se conoce su posición. La identificación de los puntos homólogos es entonces facilitada porque el espacio de búsqueda es restringido a las líneas epipolares (Delorme, 2009).

[10] Imagen Epipolar es imagen que posee la misma orientación de la imagen de referencia del par estéreo, con el propósito de eliminar el paralaje en Y. La obtención de la imagen epipolar es necesaria para permitir la observación estereoscópica. Una rectificación correcta del par estéreo realiza un remuestreo de la imagen para llevar a cabo esta orientación.

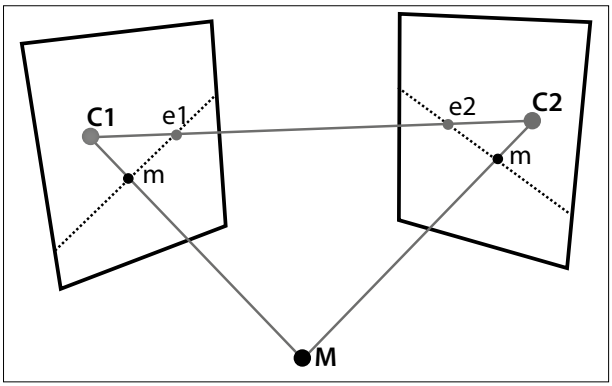


Figura 6. La geometría epipolar (la figura proviene del sitio web http://www.ai.sri.com/~luong/research/Meta3DViewer/EpipolarGeo.html).

Para determinar el nivel de detalle del MDE para la simulación se utilizó una pirámide de imágenes para hacer corresponder las imágenes de pares estereoscópicos entre ellas. Los niveles van de 1 (mínimo) a N (máximo), donde N es determinado por el tamaño de la imagen epipolar. Si el nivel 1 es escogido, la correspondencia entre las imágenes está establecida a partir de la imagen más degradada en resolución. Si el nivel N es escogido, es establecida a partir de la imagen de resolución más alta y posible (la resolución de la imagen epipolar). Este parámetro es muy importante para determinar la precisión del MDE.

Una vez generado el MDE final se obtuvo el mapa de pendientes, el cual resaltó la geometría de la cicatriz de arranque del material y la morfología del depósito. Se comparó toda la información proveniente de las imágenes y del MDE y las observaciones hechas en el terreno. Concluyendo que la resolución de 5 m de tamaño de píxel era la que daba una información más cercana a la realidad sobre el talud gravitacional.

En este caso, para este trabajo se creó un MDE de 4 bytes con una precisión isométrica en decímetros y una resolución horizontal del tamaño del píxel de 5 m; la altura mínima es de 3 600 decímetros, es decir 360 msnm y la altura máxima de 21 200 decímetros (2 120 msnm); para poder visualizarlo se utilizó el software TLALOC (Parrot, 2006).

Las bases del algoritmo Simdesl_v3.exe (Parrot, 2009) son las siguientes. El algoritmo utiliza este MDE de 5 m resolución. En primer lugar se traza una máscara (imagen binaria) que abarque la zona de prueba, es decir, desde el escarpe principal de desprendimiento de la masa rocosa hasta el frente del lóbulo o zona de depósito. En segundo lugar, se toman de apoyo las dos extremidades del escarpe principal para que el algoritmo dibuje la cuerda de esta zona semicircular. Un

cálculo baricéntrico permite entonces calcular en esta zona semicircular la altitud de cada uno de los píxeles que la definen (Figuras 7 y 8).

El cálculo del plano de deslizamiento cuya tasa de concavidad la define el usuario, reposa sobre la definición de una curva logarítmica que une el centro de la cuerda ya mencionada (punto c) y un punto ubicado al frente del lóbulo (punto e); esta curva pasa por el punto más bajo del plano de deslizamiento (punto d).

De cada lado de esta curva se aplica un proceso similar a cada uno de los píxeles de dicha curva, para así esbozar una imagen de la forma final, cuya profundidad depende de la tasa mínima de concavidad y de la altitud estimada a partir de las observaciones hechas en el terreno (Figura 7).

En esta etapa es posible calcular los volúmenes; así como la altura máxima de los depósitos o de la zona colapsada. El volumen de la zona de arrastre es igual a la diferencia entre el MDE reconstituido y el MDE original, sea $Va = MDEr - MDEo$. Es decir, que se calcula esta diferencia, cuando la altitud del MDE reconsti-

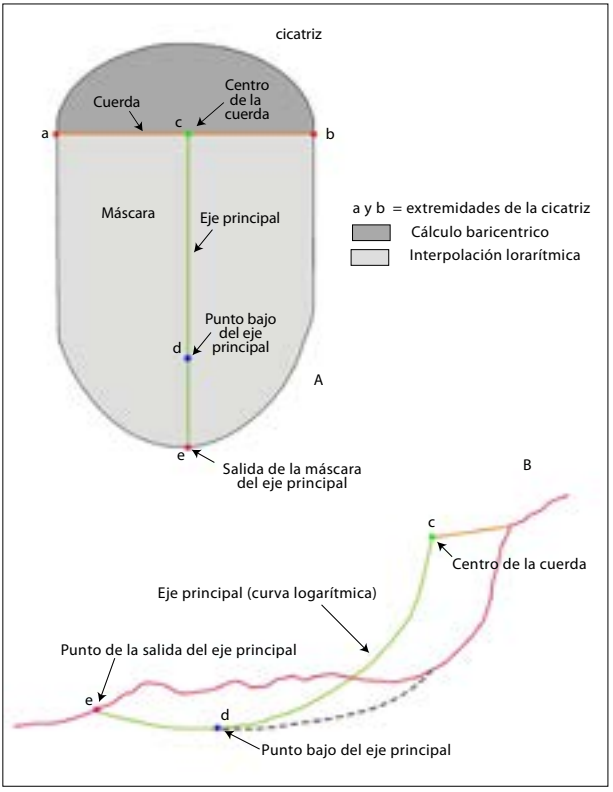


Figura 7. Esquema general indicando los puntos principales de apoyo para la simulación. A. Máscara vista en plano y B. Perfil siguiendo el eje principal. Posición de los puntos.

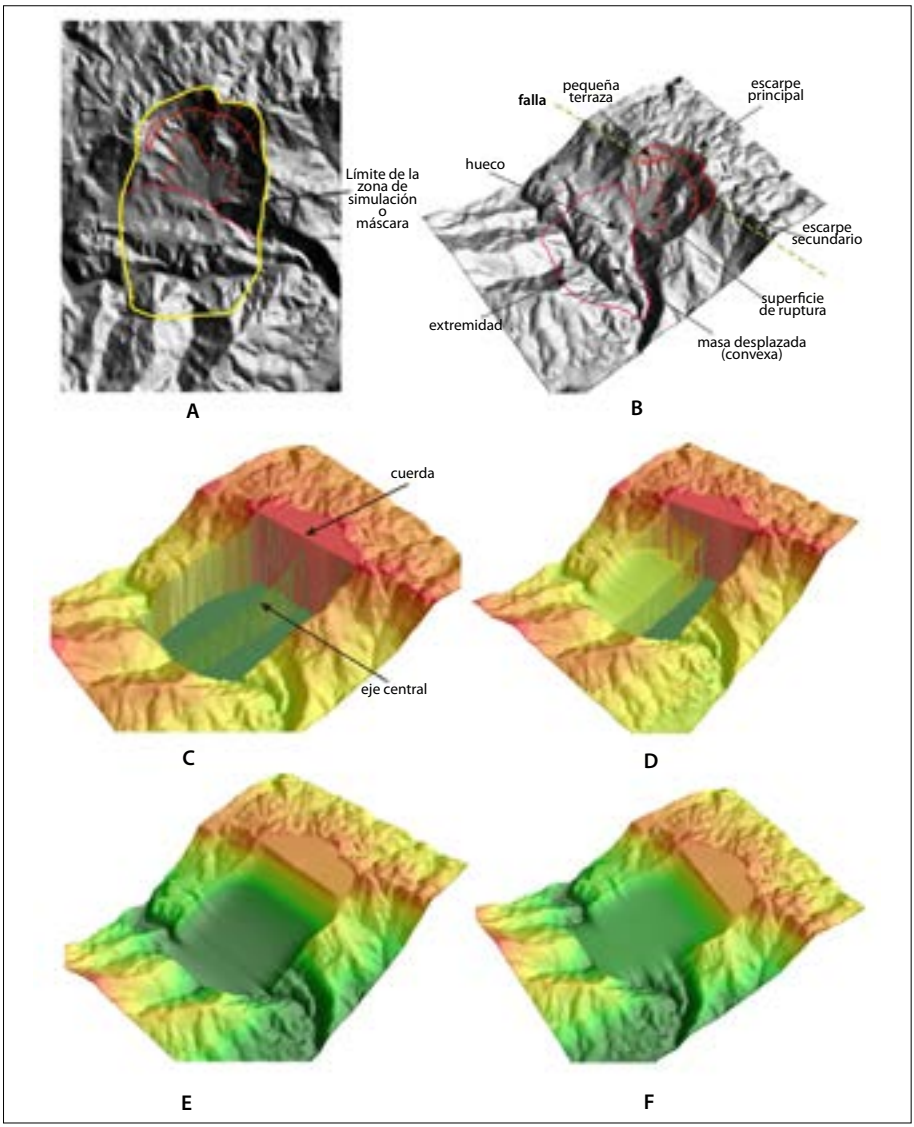


Figura 8. Etapas de la simulación con el algoritmo Simdesl.V3. A. Límite de la zona de reconstitución del talud gravitacional reportado sobre el estampado del MDE. B. Bloque 3D del relieve actual. C. Reconstitución de la vertiente y del eje central del plano de deslizamiento cóncavo. D. Reconstitución de la mitad de la zona cóncava. E. Reconstitución de la zona antes del deslizamiento (fuerte concavidad fuerte). F. Reconstitución de la zona antes del deslizamiento (poca concavidad).

tuido es más fuerte que el MDE original. Sin embargo, cuando la altitud del MDE reconstituido es inferior que la altitud del MDE original, el volumen obtenido por diferencia corresponde al volumen de los depósitos, sea $Vd = MDEo - MDEr$.

Por último, existe un tercer volumen, el cual corresponde al resultado de la erosión del depósito. En este caso, todo valor de la diferencia entre MDEr y MDEo calculado en las zonas cuya altitud es inferior al punto bajo *Pb* del plano de deslizamiento, corresponde al volumen del material erosionado. sea $Ve = MDEr - MDEo$, si la altitud del MDEr es inferior a *Pb*.

Los depósitos del deslizamiento rocoso se observan en ambos lados del curso actual del río Apulco; por esta razón se pudo suponer que se formó un lago temporal o presa río arriba (Figura 9), como el que se produjo en San Luis de Grijalva (Chiapas, México) en noviembre de 2007 (Domínguez, 2008).

En el caso de los movimientos rápidos y en función de la morfología del terreno, no es raro que las avalanchas rocosas atraviesen ríos y creen lagos de barrera, como en el caso del avalancha rocosa de Muztagata, al este de Pamir o como los gigantescos deslizamientos que se desencadenan en las vertientes de los Himalayas en donde los frentes del lóbulo crean una barrera formando grandes lagos temporales (Fort y Peulvast, 1995).

Los resultados obtenidos son los siguientes (Figura 10). El volumen desplazado en la zona del deslizamiento es igual a 0.153469 km^3 y el de la zona de acumulación representa 0.151967 km^3; conviene aclarar que el depósito gravitacional está frecuentemente afectado por procesos de remoción en masa, los cuales están sobre todo relacionados con el socavamiento del río Apulco y a su vez este fenómeno va exponiendo las formaciones de ignimbritas subyacentes.

De hecho, el fondo actual del valle se encuentra a 760 m y la base de la colada se sitúa entre 860 y 880 m; la curva de nivel 880 m ha sido trasladada

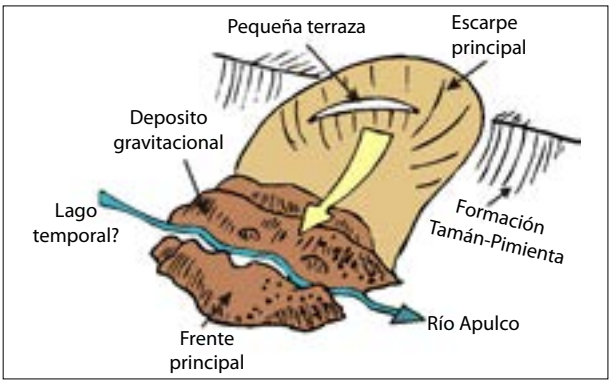


Figura 9. Esquema teórico del depósito gravitacional ocurrido en el poblado de La Galera.

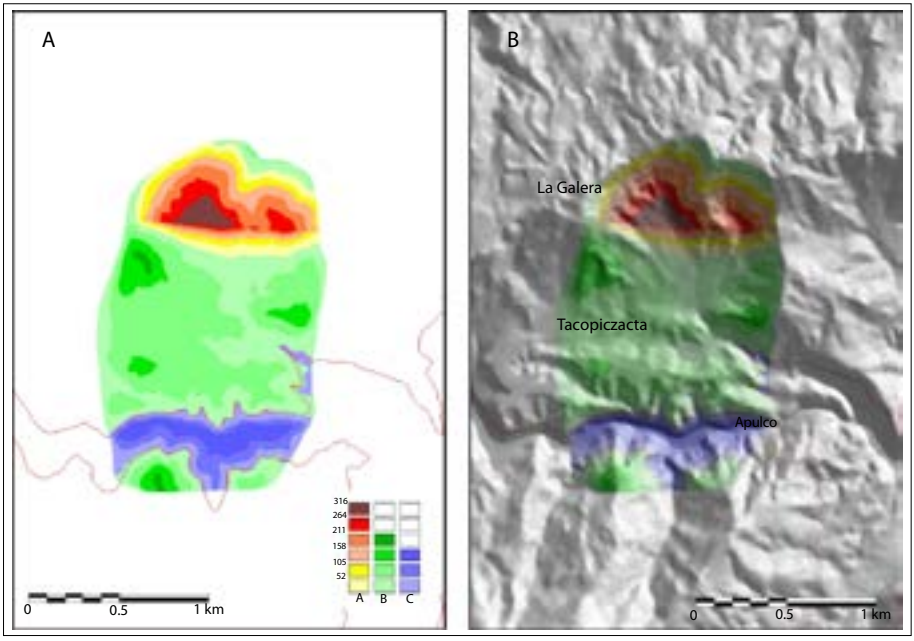


Figura 10. Resultado de la simulación. A. Espesor de los sedimentos desprendidos, depositados y erosionados; en la leyenda se presenta la columna de los valores del espesor; en rojo (A) material desprendido de la vertiente; en verde (B), material depositado; en azul (C), zona de erosión ligada a la presencia del río Apulco donde se abrió un camino en el talud gravitacional; nota: en rojo curva d e nivel 880 m. B. Superposición de la imagen precedente sobre el MDE.

sobre la imagen de la Figura 10A. El volumen erosionado ha sido estimado en 0.032384 km^3, lo que significa que el volumen total de los depósitos sería de aproximadamente 0.184 km^3. Este último valor parece correcto comparado con el valor desplazado de 0.153469 km^3 porque los depósitos de deslizamientos rocosos presentan generalmente un débil grado de compactación. Por otro lado, la altura máxima registrada en la zona de deslizamiento es de 316 m, mientras que en la zona de acumulación, fue de tan solo 169 m.

Conclusión

Estas simulaciones permiten entender mejor las relaciones observadas en el terreno entre las zonas de arrastre y las zonas de acumulación, para así definir de

manera más precisa los volúmenes respectivos de cada una de estas zonas y poder establecer un balance.

El algoritmo se adapta para estudiar otros casos de procesos de remoción en masa, ya que el punto bajo del eje principal o curva algorítmica se puede modificar tanto en profundidad como en posición sobre el eje principal. También, el algoritmo se puede adaptar al inverso para simular un proceso de remoción en masa, a partir de una ladera considerada como inestable y ver cuál sería la forma del relieve resultante.

Los datos de satélites son una poderosa herramienta para monitorear los fenómenos naturales, ya que pueden identificar las zonas afectadas en este caso por los procesos de remoción en masa; y si aunamos la información proveniente de los modelos digitales de elevación, así como las diferentes simulaciones y reconstrucciones sobre los PRM, se puede ayudar a reconstruir el sitio afectado, actualizar la cartografía, producir mapas de la dinámica del relieve, calcular los daños socioeconómicos y del paisaje del sitio. También, este tipo de estudios pueden ayudar en otras disciplinas, por ejemplo en arqueología, en el reconocimiento de zonas arqueológicas, producciones de mapas topográficos de estos sitios, las relaciones entre la evaluación de espacios y otras actividades culturales o las características del ambiente, para la reconstrucción y la cartografía de los paleo-paisajes.

Capítulo 9. Análisis de cambios con fotografías aéreas digitales e imágenes de satélite Spot5 en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca

José López García
Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

A raíz de la ampliación y recategorización como Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) del año 2000 (Brower *et al.*, 2002), en esta Área Natural Protegida se han elaborado estudios de cambio en la densidad de cobertura forestal por la World Widelife Fund (WWF, por sus siglas en inglés), utilizando fotografías aéreas digitales, usando técnicas de fotointerpretación y transfiriendo los polígonos resultantes en un ambiente de SIG, los datos reportados han evidenciado que se trata de cambios en la densidad de la cobertura forestal y no cambios en el uso del suelo, por lo que se ha creado una metodología para realizar estas evaluaciones de densidad de cobertura forestal, aplicable al uso de fotografías aéreas digitales (López, 2009).

La principal problemática con este método es la realización del levantamiento aéreo, debido a que en México no se dispone de aviones que reúnan las características necesarias y disposición de un piloto para llevar a cabo éstos, así como las condiciones meteorológicas adversas que se presentan en febrero y marzo, aunado a los trámites administrativos que hay que sortear para que el INEGI dé la autorización; lo difícil es hacer coincidir estos tres aspectos (López, 2007). Esto ha motivado, como alternativa, el análisis de cambio con el apoyo de imágenes de satélite Spot5, dando resultados poco satisfactorios (López, 2006). Aunque el uso de imágenes de satélite para el monitoreo de la deforestación y la determinación del uso del suelo, constituye en la actualidad un aporte fundamental al permitir acercar los resultados a la realidad con mucha precisión y certeza, en función a un tratamiento adecuado de las imágenes satelitales (Jensen, 2007). Pero cuando se requiere mayor precisión, y bajo costo, es recomendable el uso de fotografías

aéreas de alta resolución, que permiten obtener resultados muy confiables (López, 2009).

La enorme desventaja del uso de imágenes para detectar cambios en un análisis bi-temporal, es que requiere de ciertas condiciones en la adquisición de éstas lo que difícilmente se logra, y solo así se podría garantizar un coregistro de imágenes, como son el ángulo de toma de la imagen, paso del satélite y hora de toma (López, 2007).

El objetivo es determinar el cambio en la densidad de cobertura forestal, bajo una metodología híbrida, que complemente el uso de fotografías aéreas digitales e imágenes Spot5, para realizar el análisis de cambios (2006-2007).

Metodología

Para desarrollar esta metodología híbrida se dio particular importancia al preprocesamiento y procesamiento. Se logró una resolución de 2.5 m al remuestrear la imagen en color de 10 m con la pancromática de 2.5 m. Con base en lo anterior y después de hacer varias pruebas, se llegó a establecer una metodología para este análisis, la cual se basó en el uso de un mosaico ortocorregido, elaborado con fotografías aéreas digitales del 2006 y la imagen Spot5 de 2007, utilizando un método de comparación visual y digitización en pantalla sobre el mosaico ortocorregido de 2006.

Se realizó un análisis comparativo visual de fotografías aéreas digitales de 2006, con apoyo de un mosaico ortocorregido de 2006 e imágenes Spot5 de 2007, para determinar cambios en la densidad de cobertura forestal en ese periodo. Se definió el uso de la Proyección Universal Tranversa de Mercator (UTM), con el Elipsoide Clarke 1866 y Datum NAD 27 y unidades en metros.

El levantamiento aéreo de 2006 cubre aproximadamente 600 km^2, con 650 fotografías aéreas digitales en color, distribuidas en 17 líneas de vuelo, con una sobreposición lateral de 30% y una sobreposición longitudinal de 60% y 0.4 4 m/píxel. Las fotografías fueron impresas a escala 1:10 000, en papel opalina a tamaño carta. Para su interpretación y preparación se utilizaron las técnicas convencionales de fotointerpretación. La separación de la densidad de cobertura forestal se realizó con base en una leyenda de cinco clases, en donde se combinaron algunos criterios de FRA (2005), considerando como deforestado la superficies con menos de 10% de árboles (Tabla 1). La densidad de cobertura forestal menor al 10% es considerada como deforestada (*Ibid.*), las clases de cobertura fueron validadas con base en muestreos de campo.

Tabla 1. Densidades de la cobertura forestal

Clave	Cobertura	Densidad %
1	Cerrada	> 75
2	Semicerrada	50 – 75
3	Semiabierta	25 – 50
4	Abierta	10 – 25
5	Deforestado	< 10

Una vez terminada la fotointerpretación se procede a la verificación de campo de cada una de las unidades, haciendo muestreos para conocer el número de árboles, diámetro y altura, lo que permitió establecer los intervalos del número de árboles para cada una de las densidades de cobertura. Se realizaron muestreos circulares de 1 000 m^2. Se consideró un área mínima cartografiable de 500 m^2, lo que representa unos 30 árboles de cobertura cerrada, con diámetro y altura promedio 0.3 y 26 m, respectivamente.

Considerando que la detección de cambios requiere de la diferenciación de cambios de la densidad en la cobertura forestal, se hace necesario trabajar a escalas mayores a 1:10 000, por lo que se trabajó a una escala estándar de 1:5 000 en formato digital.

Para la imagen Spot5 de 2007 se hizo la corrección geométrica mediante el ajuste de puntos de control a las imágenes con referencia en las ortofotos de 1994 (a 1 m/píxel), del INEGI (1994). Fue necesario utilizar tres escenas de las imágenes Spot5, dos del 11 de abril del 2007 y una del 28 de diciembre de 2006 (para cubrir un 10% del área), en formato multi-espectral y pancromático.[11]

Para hacer más fácil el análisis comparativo se elaboró un mosaico ortocorregido en Erdas Imagine™, a partir de fotografías aéreas digitales tomadas el 2 y 3 de marzo de 2006, obteniendo una resolución espacial de 1 m/píxel. Se realizaron correcciones radiométricas para mejorar las variaciones de iluminación de las escenas, la geometría de observación de los satélites, las condiciones atmosféricas, la respuesta del sensor y efectos de ruido.

Para mejorar la precisión que presentaba la imagen en formato numérico, por anomalías en la localización de los píxeles y en los niveles digitales que componen la matriz de datos, se convirtieron los ND (niveles digitales) a radiancia

[11] Las escenas Spot5 tienen una cobertura de 60 x 60 km, capturan información en cuatro bandas, tres multiespectrales XS1, XS2, XS3 de 10 m de resolución espacial por píxel, y una banda pancromática a 2.5 m de resolución por píxel.

y reflectancia, para de este modo, comprender mejor la información contenida (Richards y Jia, 2006).

La conversión de ND a radiancia espectral se realizó calibrando:

$$Gain = \frac{L_{\max \lambda}}{254} - \frac{L_{\min \lambda}}{255}.$$

La conversión de la radiancia espectral a reflectancia, se utilizó:

$$\rho = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos(SZ)},$$

donde:

d^2: es el cuadrado de la distancia del Sol a la Tierra en unidades astronómicas. (aprox. 1 UA)

$d^2 = (1-0.01674\cos(0.9856(JD-4)))^2$ donde JD es el día juliano.

L_{λ} : es la radiancia espectral de cada banda a su longitud de onda λ $(mWcm^{-2}ster^{-1}\mu m^{-1})$.

$ESUN_{\lambda}$: irradiancia solar media en $mWcm^{-2}\mu m^{-1}$ fuera de la atmósfera.

SZ : es el ángulo cenital solar en radianes, considerando, θ_e que es el ángulo de elevación de adquisición de la imagen.

Para atenuar la bruma y niebla contenida en las imágenes, se procedió a ejecutar la corrección atmosférica, se evaluó de acuerdo con histogramas y se aplicaron realces de contraste, debido a efectos atmosféricos y ángulo de toma.

Se usó Erdas Imagine™ para el tratamiento de imágenes, se fusionaron las bandas multiespectrales XS e infrarrojo con la banda pancromática, obteniendo así la mejora espacial en las imágenes (Figura 1).

Para mejorar la calidad de las imágenes se empleó un filtraje, aplicando la Trasformada de Fourier, considerada útil por el número de operaciones que se realizan tanto para transformar como para reconstruir las señales en cuestión; y está definido por:

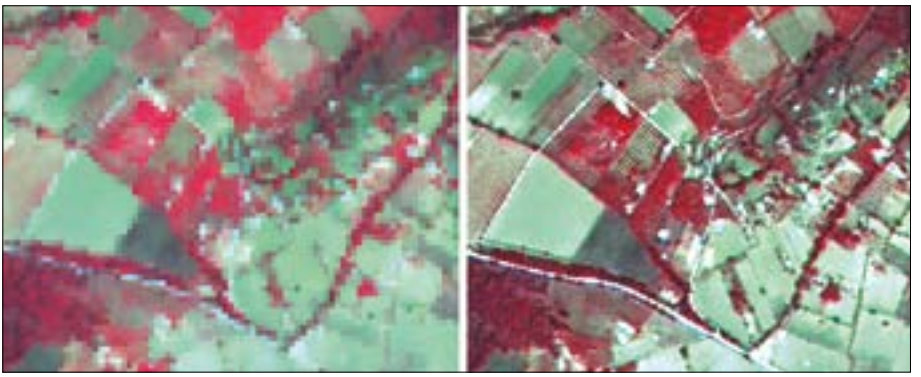


Figura 1. Derecha, imagen multi-espectral a 10 m/píxel; izquierda, imagen multi-espectral mejorada a 2.5 m/píxel.

$$X(j) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-2\pi ijk / N}$$

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X(j) e^{2\pi ijk / N}$$

donde x(k), para k = 0,…,N-1, es la señal de entrada; y X(j), para j = 0,…,N-1, es la transformada de x(k), siendo N la longitud de la señal (Figura 2).

El proceso metodológico consistió en la comparación visual para la separación de unidades de cambio, al comparar en una computadora personal provista

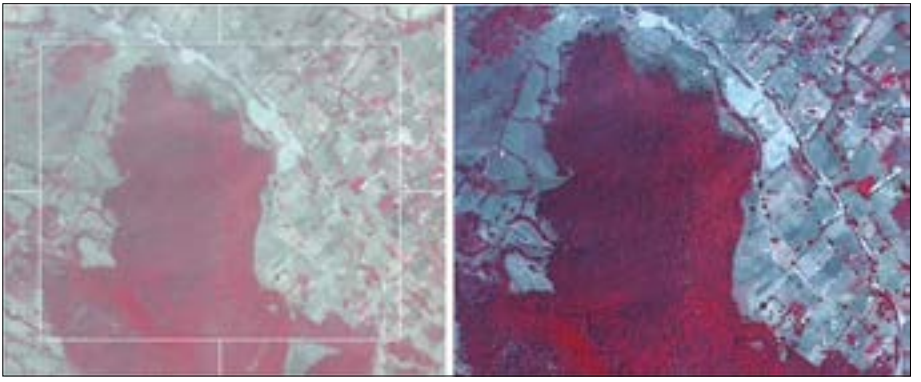


Figura 2. Aplicación de la Trasformada rápida de Fourier (izquierda, imagen original, derecha imagen después de la aplicación de la Transformada).

de dos monitores, por un lado un ortomosaico de 2006 y por otro una imagen Spot5 de 2007 (Figura 3), para lo cual fue necesario crear una máscara de los polígonos de la Reserva. La comparación se realizó a escala 1:5 000, los cambios se fueron digitalizando en pantalla, mediante restitución por triangulación, sobre el mosaico ortocorregido, con apoyo de ERDAS y usando una retícula, lo que permitió el análisis comparativo por cuadrantes (1 km^2), ordenado de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, a una escala estándar de 1:5 000, modificando el mapa base de densidad de coberturas forestales de 2006 elaborado por fotointerpretación.

Los polígonos de cambio al ser digitizados sobre la cobertura 2006, solo permiten modificar los cambios, convirtiendo el mapa a densidades de coberturas forestales 2007. La simple resta de ambos mapas (2007-2006), resulta en los polígonos de cambio en este periodo, que fueron verificados en recorridos de campo, realizando las modificaciones pertinentes.

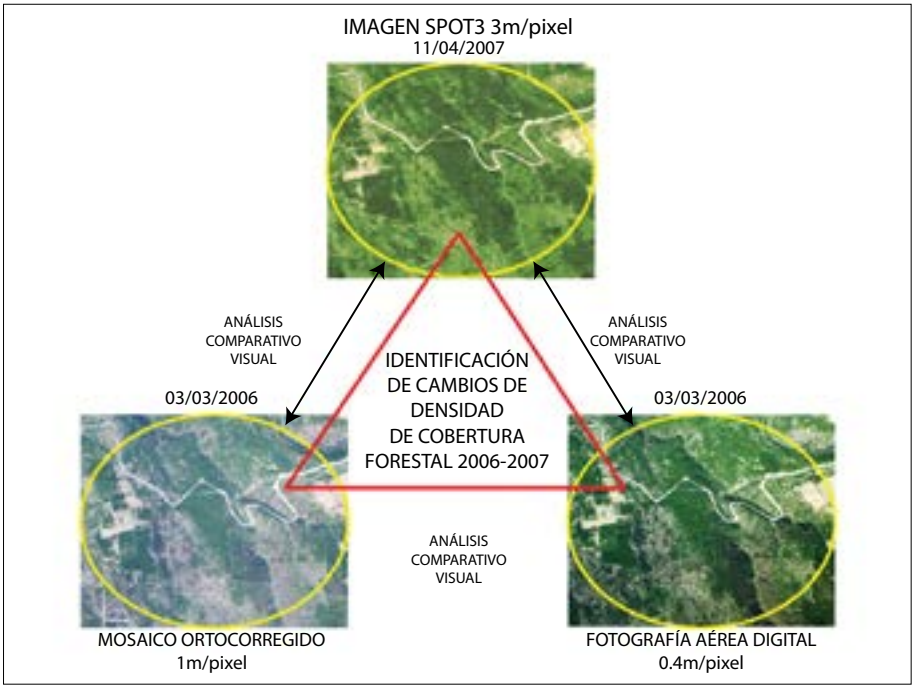


Figura 3. Esquema metodológico de identificación de cambios 2006-2007.

Resultados

El primer resultado es el aporte metodológico que combina fotografías aéreas digitales (mosaico ortocorregido) e imágenes de satélite Spot5 para realizar estudios bi-temporales, por medio de comparación visual para determinar cambios en la densidad de cobertura forestal.

La comparación visual del mosaico 2006 y la imagen 2007 (Figura 4), permitió la separación de las zonas de cambios entre este periodo, con apoyo del mapa de densidad de coberturas forestales de 2006 elaborado por fotointerpretación. Los recorridos de campo permitieron la validación de los cambios de densidad de cobertura forestal, donde la comparación visual resultó ser el método con mayor certeza y confiabilidad, con valores de confianza muy altos.

El mapa de densidad de coberturas forestales 2006, es producto de interpretación de fotografías aéreas digitales, con técnicas convencionales de fotogrametría y fotointerpretación. El resultado de la comparación visual del mosaico ortocorregido de 2006 y las imágenes Spot5 2007, así como el auxilio de fotografías aéreas digitales de 2006, permitió determinar los cambios en este periodo y la elaboración del mapa de densidad de cobertura forestal 2007 (Figura 5).

El análisis bi-temporal permitió obtener una matriz de cambios de densidad de cobertura forestal entre 2006 y 2007 (Tabla 2), siendo nulos los cambios de uso del suelo.

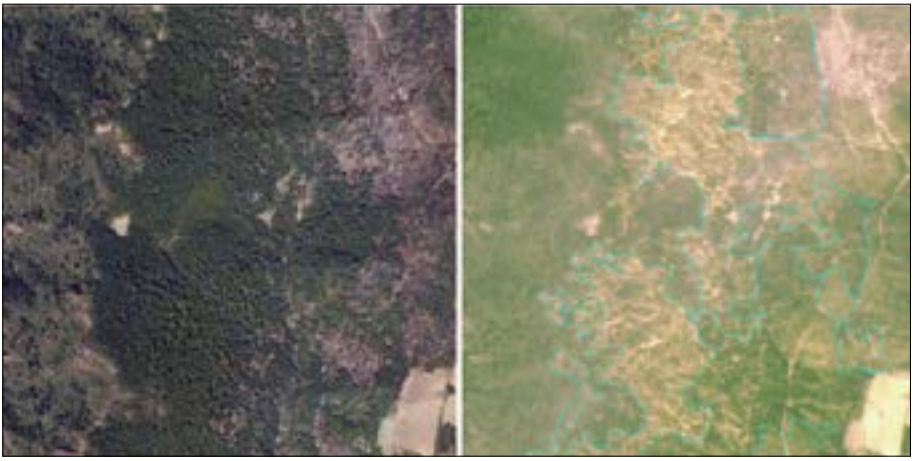


Figura 4. Comparación del mosaico 2006 y la imagen Spot5 2007.

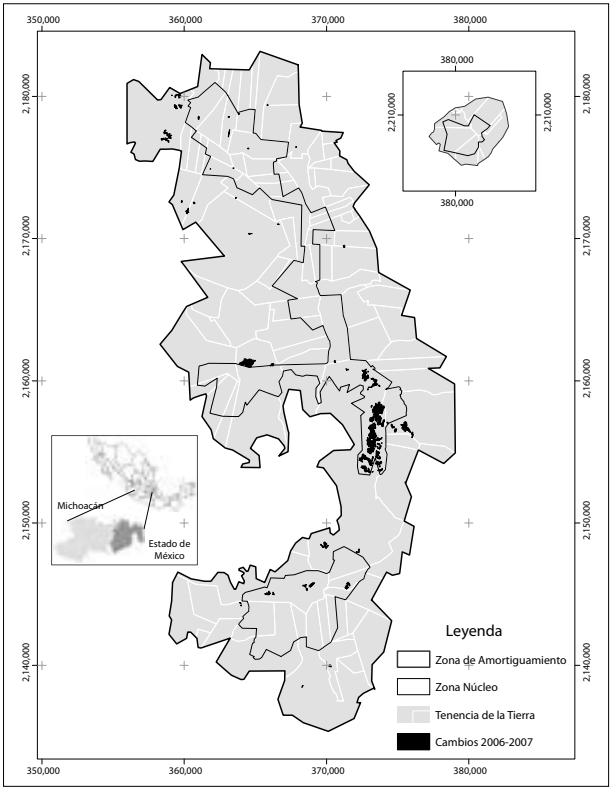


Figura 5. Localización de los cambios 2006-2007 en la RBMM.

Tabla 2. Matriz de cambios en la RBMM

Superficie de cambio 2006 - 2007 (ha)						
Cobertura	Cerrada	Semicerrada	Semiabierta	Abierta	Deforestado	Total 2007
Cerrada		5.01	62.30	55.33	82.55	205.19
Semicerrada			9.48	15.48	29.76	54.72
Semiabierta				30.63	18.74	49.37
Abierta					37.83	37.83
Deforestado						
Total 2006		5.01	71.78	101.44	168.90	347.12

El análisis reportó el cambio en la densidad de cobertura forestal en 347.12 ha de bosques, siendo más intensa en la zona núcleo con 252.60 ha (72.77%), por tala clandestina, con respecto a la zona de amortiguamiento con

94.53 ha (27.23%). Algunos tenían permisos de aprovechamiento, pero otros en colindancia con los ejidos de Crescencio Morales y Nicolás Romero, sufrieron tala clandestina, por la cercanía. Las coberturas cerradas y semicerradas fueron las más afectadas con 259.91 ha (Tabla 3).

De los cambios detectados y analizados por predio (Tabla 4), el 96.47% se refieren a dos, al ejido Crescencio Morales y un 5.01% al Ejido Nicolás Romero. Éstos no participaban en ese momento del Pago por Servicios Ambientales y había un litigio entre el ejido y la comunidad, lo que motivó la tala clandestina en esa zona, afectando a los ejidos colindantes. Son las zonas más problemáticas y que tienen acceso a la carretera México-Morelia y son considerados como zonas de tala ilegal, lo cual ha estado creando conflictos en la región.

La zona núcleo sufrió una deforestación en 132.47 ha (52.44%) y degradación forestal de 120.12 ha (47.55%) y, dando un total de área dañada de 252.60 ha en el periodo 2006-2007. Considerando los porcentajes de cada categoría se puede decir que la zona fue afectada severamente ya que el 84.64% fue una altera-

Tabla 3. Superficie y porcentaje de cambios por zona en la RBMM

Cambios de cobertura forestal 2006-2007 en la RBMM						
Densidad de cobertura	Amortiguamiento		Núcleo		Total	
	ha	% Rel.	ha	% Rel.	Ha	% Abs.
Cerrada	60.11	63.59	145.08	57.44	205.19	59.11
Semicerrada	6.19	6.55	48.54	19.21	54.72	15.76
Semiabierta	11.51	12.17	37.87	14.99	49.37	14.22
Abierta	16.72	17.69	21.11	8.36	37.83	10.90
Total	94.53	100.00	252.60	100.00	347.12	100.00

Tabla 4. Predios con afectación en la zona núcleo

Alteración en zona núcleo		
Predios	ha	%
Crescencio Morales	231.02	91.46
Nicolás Romero 2	12.67	5.01
Litigio1	5.65	2.24
Ocho predios con superficie < 1 ha	3.26	1.29
Total	252.60	100.00

ción a superficies abiertas y deforestadas, esto es a coberturas por debajo de 25% (Tabla 5).

En el caso de la zona de amortiguamiento, la degradación forestal (61.47%), son cambios originados por aprovechamiento forestal autorizado y considerados como manejo forestal y la deforestación en su totalidad se trata de tala clandestina (Tabla 6 y Figura 6). Todos los cambios fueron constatados en campo, por lo que la certeza es de un 100%, siendo diferentes las causas de la afectación; en algunos casos por condiciones naturales.

Tabla 5. Deforestación y degradación forestal en zona núcleo

Núcleo	Cambio 2006-2007	ha	%	Total
Deforestación	Cerrada - Deforestado	73.02	28.91	132.47 ha 52.44%
	Semicerrada - Deforestado	26.01	10.30	
	Semiabierta - Deforestado	12.34	4.88	
	Abierta - Deforestado	21.11	8.36	
Degradación forestal	Cerrada - Abierta	42.53	16.84	120.12 ha 47.55%
	Semiabierta - Abierta	38.78	15.35	
	Semicerrada - Semiabierta	33.80	13.38	
	Cerrada - Semicerrada	5.01	1.98	
Total		252.60		

Tabla 6. Deforestación y degradación forestal en zona de amortiguamiento

Amortiguamiento	Cambio 2006-2007	ha	%	Total
Deforestación	Cerrada - Deforestado	9.54	10.09	36.42 ha 38.53%
	Semicerrada - Deforestado	3.76	3.97	
	Semiabierta - Deforestado	6.41	6.78	
	Abierta - Deforestado	16.72	17.69	
Degradación forestal	Cerrada - Abierta	12.8	13.54	58.10 ha 61.47%
	Semiabierta - Abierta	7.33	7.75	
	Semicerrada - Semiabierta	0.2	0.21	
	Cerrada - Semiabierta	37.78	39.96	
Total		94.54	100%	

Figura 6. Aprovechamiento forestal en el ejido El Paso en zona de amortiguamiento. Izquierda Mosaico 2006 y derecha imagen Spot5 2007.

El ejido El Paso tuvo una superficie de 37.02 ha de aprovechamiento autorizado y pasó de coberturas cerradas a semiabiertas y abiertas, en menor medida de semicerrada a semiabiertas (Tabla 6 y Figura 6).

Los predios con mayores cambios fueron aprovechamientos autorizados por 79.71 ha, equivalente a 84.32%, el resto son considerados como tala ilegal (Tabla 7).

En la Figura 6 se puede apreciar la disminución en la cobertura forestal, se evidencia inequívocamente el cambio en la densidad del arbolado, al pasar de cobertura cerrada a coberturas semiabiertas, en una superficie de 35.42 ha. El trabajo de campo constató el cambio, pero se trata de una zona de aprovechamiento autorizado en la zona de amortiguamiento.

Tabla 7. Predios en zona de amortiguamiento que sufrieron cambios de cobertura

Cambios en zona de amortiguamiento		
Predios	ha	%
El Paso	37.02	39.16
El Depósito	24.98	26.43
Propiedad Privada 3	17.71	18.73
Crescencio Morales	7.18	7.59
Rondilla	2.46	2.60
Predios con superficie < 1.25 ha	5.15	5.45
Total	94.53	100.00

Por otro lado, los cambios detectados en la Propiedad Privada 3 son pequeños y se distribuyen en dos porciones del predio, algunos de ellos son resultado de plagas y árboles muertos; para 2007 aparece sin arbolado, o al menos eso se aprecia en la imagen Spot5 (Figura 7).

La zona montañosa de Crescencio Morales es una de las más húmedas de la región y por tanto se forma alta nubosidad y en la imagen Spot5 de 2007 se aprecia niebla y bruma, lo que dificulta la interpretación, pero para esta parte se contó con fotografías aéreas digitales de abril de 2007, y apoyados con la imagen Spot5 de abril de 2007, se logró hacer la separación de las áreas afectadas. Para esta zona se utilizó interpretación comparativa de fotografías aéreas digitales de 2006 y 2007, lo que permitió afinar esta separación de cambios. Se evidencia el cambio en el paisaje (Figuras 8 y 9).

Se comprobó que hay gran alteración de las laderas que han sido deforestadas, con presencia de procesos de erosivos e inestabilidad de laderas que los hacen susceptibles a la formación de flujos de lodo bajo condiciones meteorológicas extremas que, de continuar así, ponen en peligro a los asentamientos ubicados en la parte baja. Es una zona de fuertes pendientes afectada frecuentemente por incendios forestales.

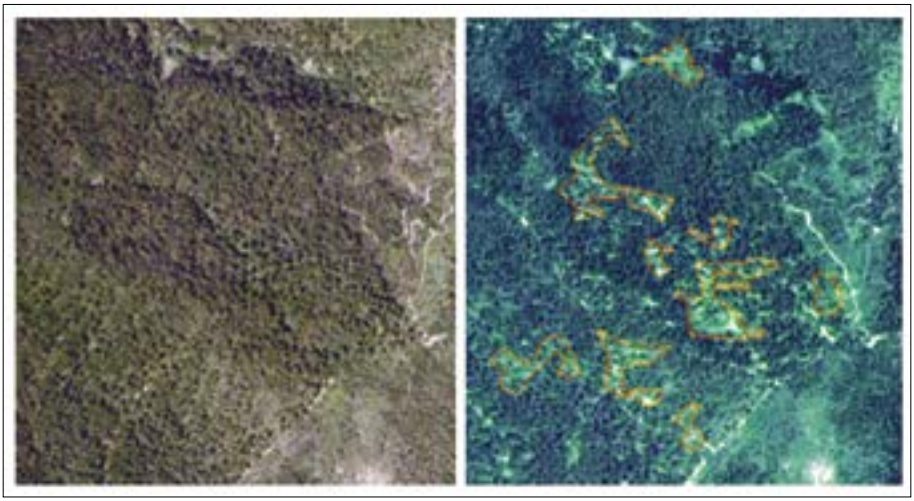


Figura 7. Cambios de coberturas cerradas a deforestada. Izquierda mosaico 2006 y derecha imagen Spot5 de 2007.

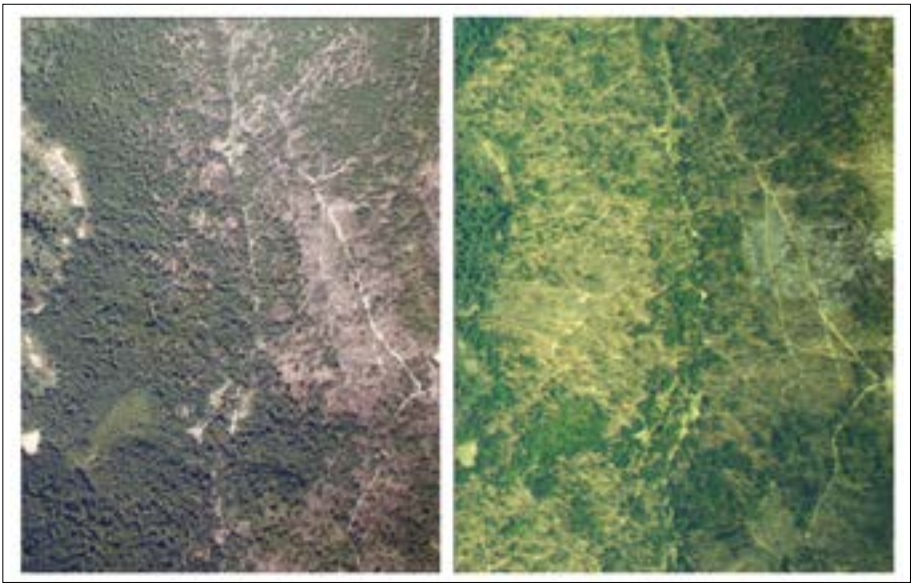


Figura 8. Comparación de fotografías 2006 y 2007, en Crescencio Morales.

Figura 9. Comparación aerofotográfica en el ejido Crescencio Morales.

Conclusión

La comparación de la imagen Spot5 de 2007 con el mosaico aerofotográfico de 2006 permitió establecer una metodología sólida para la separación y cuantificación de cambios en densidad de cobertura forestal utilizando fotografías aéreas digitales e imágenes de satélite. Este tratamiento de la información logró con buena precisión la identificación de cambios por deforestación y perturbación forestal.

La contribución fundamental es el análisis visual combinado con imágenes Spot5/2007 llevada a 2.5 m/píxel y un mosaico aerofotográfico 2006, a 1 m/píxel, coadyuvaron a obtener resultados satisfactorios en la separación e identificar los cambios de perturbación forestal y deforestación.

Agradecimientos

Este trabajo recibió apoyo PAPIIT (IN305707), dentro del proyecto Evaluación del cambio de cobertura forestal bianual con fotografías aéreas digitales en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca.

Capítulo 10. Ajustes del algoritmo AQM2008 para identificación de áreas quemadas usando imágenes MODIS

Lilia Manzo Delgado
Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Cada año se queman extensas superficies agrícolas, pecuarias y forestales induciendo cambios en la calidad del aire, la cobertura vegetal y la erosión del suelo. Después de la catastrófica temporada de incendios 1997-1998 en México, al igual que en otros países, se reforzaron los programas de prevención y detección de incendios utilizando diversas técnicas de percepción remota (PR), imágenes de satélite y sistemas de información geográfica (SIG). Estos avances han sido de gran utilidad para las brigadas que combaten, controlan y registran estos eventos; logrando complementar los reportes con información referente a la ubicación del evento, además de las fechas de inicio y terminación. Por otra parte, las instituciones responsables del monitoreo de incendios presentan informes diarios, semanales o mensuales del número de incendios detectados.

Actualmente se considera que los avances logrados en materia de incendios han sido muy buenos; sin embargo, es necesario abordar otros temas de gran relevancia, entre los que destacan la identificación y cartografía de superficies afectadas por el fuego, logrando con ello conocer el patrón de distribución espacial y temporal de estos eventos en diversas escalas geográficas ya sea local o global. Un estudio de tal magnitud requiere sin duda el apoyo de diversas técnicas de PR e imágenes de satélite. La cartografía de superficies quemadas constituye una base sólida para evaluar los cambios ocasionados por el fuego sobre la vegetación, los suelos y la atmósfera, además de constituir un apoyo importante para desarrollar programas de reforestación y recuperación de este tipo de superficies.

A finales de 2004 se formó la Red Latinoamericana de Teledetección de Incendios Forestales (RedLatif) con apoyo del programa internacional GOFC-

GOLD, teniendo como objetivo inicial cartografiar las superficies quemadas de gran extensión ocurridas en 2004, desde México hasta la Patagonia en Argentina, utilizando los compuestos MODIS de 32 días de reflectancia de la superficie, logrando construir el algoritmo AQL2004, mediante el cual se obtuvo información relevante a escala regional y nacional (Chuvieco *et al*., 2008). En la actualidad RedLatif, en el marco del proyecto Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudios de los Recursos Naturales (SERENA) se ha propuesto desarrollar un algoritmo que permita evaluar sistemáticamente las áreas quemadas en Latinoamérica, utilizando imágenes MODIS diarias y compuestos de 16 días de reflectancia de la superficie (MCD43B4), tomando como periodo de análisis el año 2008, Para lograr esto se establecieron las siguientes etapas: *a)* selección de áreas piloto, *b)* aplicación y validación de diferentes algoritmos a escala local, *c)* análisis comparativo entre los algoritmos y *d)* aplicación y validación regional. En la primera etapa se eligieron seis Tiles o ventanas MODIS como áreas piloto, las cuales se ubican en México, Cuba, Colombia, Paraguay, Brasil y Argentina. De manera particular, el Tile correspondiente a México cubre la región sureste del país y parte de Centroamérica. Este trabajo expone los avances de la segunda etapa obtenidos para el área piloto asignada para México.

El objetivo general es proporcionar las bases físicas para identificar y cartografiar las superficies quemadas utilizando técnicas de percepción remota e imágenes de satélite. Así mismo se presentan los avances para desarrollar el algoritmo AQM2008 que discrimina las superficies quemadas en el sureste de México, tomando como base el algoritmo AQL2004 y que utiliza el producto estándar MODIS MCD43B4 del periodo 2008, constituyendo un insumo importante para desarrollar un nuevo algoritmo para Latinoamérica.

Propiedades físicas de las superficies quemadas

Recientemente las superficies quemadas se caracterizan por presentar depósitos de ceniza y carbón, así como afectaciones estructurales en la vegetación tales como el chamuscado de troncos, ramas y hojas, por mencionar algunos. La combinación de estas características logra que estas superficies se vean diferentes a su entorno, permitiendo conocer el límite exterior y la superficie afectada por el fuego. Estos efectos constituyen señales o marcas de incendio, cuya permanencia es muy variable en el tiempo, dependiendo de las condiciones meteorológicas, particularmente el viento y la precipitación, así como la capacidad de recuperación de la vegetación (Pereira *et al*., 1999).

Aunque la ceniza y el carbón son productos de la combustión vegetal, tienen un origen diferente (Robinson, 1991). La ceniza se forma a partir de la combustión total de la biomasa, con buen suministro de oxígeno, en incendios de gran intensidad. El carbón se origina a partir de una combustión poco eficiente, bajo condiciones restringidas de oxígeno, en un incendio de menor intensidad (Pereira *et al*., 1999). Ambas señales tienen una duración relativamente corta que puede ser atenuada fuertemente por el viento y la lluvia en algunas semanas o meses después del incendio**.**

Los cambios en la estructura vegetal modifican la densidad de cobertura, siendo más evidentes cuando se eliminan los elementos arbóreos o arbustivos. De manera complementaria, estos cambios son más estables en comparación con la ceniza y el carbón, permaneciendo de dos a tres semanas en el pastizal tropical y varios años en el bosque templado. Sin embargo, los cambios en la densidad de cobertura se consideran menos apropiados para identificar las áreas quemadas porque su origen puede ser diferente a un incendio, como sucede con los desmontes, pastoreo, ciclones o plagas.

Las propiedades físicas de las superficies quemadas facilitan la discriminación visual en las imágenes de satélite porque son muy diferentes a su entorno. En la discriminación de áreas quemadas uno de los procesos básicos es comparar las superficies antes y después de la temporada de incendios. En este caso, cabe recordar que el comportamiento espectral de la vegetación está determinado en gran parte por el estado fenológico de las hojas que forman el dosel, su contenido de agua y densidad de cobertura. Cuando la vegetación se encuentra en estado óptimo de crecimiento y sin problemas de estrés, es decir, que está vigorosa y sana, su característica más sobresaliente es que su reflectancia es baja en la región del visible (0.4 a 0.7 μm), con un máximo relativo en la porción verde del espectro (0.55 μm). Por el contrario, en el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm) ésta presenta una reflectancia elevada que se reduce en el infrarrojo medio (1.3 a 2.6 μm). La baja reflectancia en el espectro visible se debe a la absorción de los pigmentos fotosintéticos que se encuentran en los cloroplastos: clorofilas, xantofilas y carotenos. La elevada reflectancia en la región del infrarrojo cercano (0.7 – 1.3 μm) se debe a la estructura del mesófilo (tejido interno de la hoja), que difunde y dispersa la energía, mientras que las variaciones en la región del infrarrojo medio son resultado del efecto absorbente del agua.

El comportamiento espectral de las superficies quemadas se caracteriza por presentar un incremento en la reflectancia de la región visible (0.4 a 0.7 μm), en combinación con una disminución de ésta en el infrarrojo cercano, incrementándose nuevamente en la región del infrarrojo medio (1.3-8.0 μm) y térmico

(8.0-14.0 μm). Los diversos cambios están relacionados con la interrupción de la actividad fotosintética, afectación en la estructura interna de las hojas y pérdida del efecto absorbente del agua. A continuación se describen las características espectrales de las superficies quemadas en diferentes regiones del espectro electromagnético (Pereira *et al*., 1999).

Visible (0.4 – 0.7 μm)

En esta región espectral las superficies quemadas presentan un incremento en la reflectancia que se debe especialmente a la ausencia de pigmentos fotosintéticos que puedan absorber la energía en estas longitudes de onda, ocasionando a su vez el aumento en la reflectancia. Los cambios espectrales antes y después del incendio constituyen un apoyo importante para discriminar las áreas quemadas. Sin embargo, los nuevos valores de reflectancia se pueden confundir con otras superficies terrestres: bosques densos, cuerpos de agua o suelos oscuros. Debido a ello, esta región se considera limitada para discriminar las superficies quemadas.

Infrarrojo cercano (0.7 – 1.3 μm)

En este intervalo espectral las superficies quemadas son poco reflectivas y pueden ser discriminadas fácilmente cuando la ignición produce gran cantidad de carbón que se deposita en el suelo. En ausencia del fuego, la vegetación es muy reflectiva en cualquier estado fenológico, constituyendo un factor de comparación importante para discriminar las superficies quemadas, el cual puede ser complementado con los cambios espectrales que ocurren en la región del visible. Así, una superficie quemada presentará un incremento en la reflectancia del visible y una disminución en la reflectancia en el infrarrojo cercano. Debido a ello, el espacio biespectral visible/IRC ha sido utilizado ampliamente para identificar las superficies quemadas.

Infrarrojo medio (1.3 – 8.0 μm)

En estas longitudes de onda las superficies quemadas son muy reflectivas, lo cual se atribuye a la pérdida de agua en los tejidos de las plantas. Esta respuesta se puede considerar semejante a la que se presenta en la región del visible; sin embargo, el incremento es mayor en el infrarrojo medio (IRM). Debido a estas diferencias se ha considerado que el espacio biespectral IRC/IRM es más apropiado para discriminar las áreas quemadas en comparación con el visible/NIR mencionado anteriormente. En complemento, la región del IRM también se considera importante para evaluar la variabilidad interna de las áreas quemadas y la severidad del incendio.

Infrarrojo térmico (8.0 – 14.0 µm)

En este intervalo espectral las superficies quemadas incrementan la temperatura superficial. Esto se debe a que la apertura del dosel favorece una mayor entrada de energía, así como a la reducción del efecto aislante de la capa de hojarasca y la disminución del agua en la parte superficial del suelo. Sin embargo, cuando las diferencias son pequeñas (< 5° C) es muy difícil discriminar las superficies quemadas. Así mismo, la señal térmica desaparece muy pronto, especialmente cuando la vegetación comienza a surgir. A pesar de sus limitaciones, estas respuestas, junto con las del infrarrojo medio, han sido consideradas de gran importancia para desarrollar un indicador para discriminar las áreas quemadas.

Discriminación de las superficies quemadas

La información espectral que se registra en las imágenes captadas por diversos sensores a bordo de los satélites, ha permitido desarrollar varias técnicas que facilitan la identificación y cartografía de áreas quemadas. Estas técnicas se apoyan principalmente en la utilización del índice de vegetación y la temperatura de la superficie terrestre, los cuales presentan valores diferentes antes y después del incendio. En ambos casos, la definición de la magnitud del cambio espectral juega un papel determinante para identificar un área quemada. Por ejemplo, las superficies que presentan un decremento en el índice de vegetación NDVI han sido consideradas como áreas quemadas. Dichas áreas también han sido discriminadas cuando la reflectancia en el infrarrojo de onda corta disminuye, con un incremento simultáneo en la temperatura de brillo (Eva y Lambin, 1998). Así mismo, la combinación de los cambios simultáneos en la temperatura de brillo y el NDVI ha mejorado la identificación de áreas quemadas.

En los casos mencionados anteriormente la definición de un umbral espectral asociado a la superficie quemada juega un papel importante. Sin embargo, son derivados empíricamente examinando otros datos de PR; por ejemplo, análisis comparativo entre imágenes antes y después de la temporada de incendios; utilizando la detección de incendios activos. Mientras que estos procesos proporcionan información útil de los cambios entre áreas quemadas y no quemadas, su precisión está limitada a las características particulares del tipo de vegetación. Debido a ello, pueden fallar al aplicarse en regiones con una cobertura vegetal diferente. Así mismo, su capacidad es muy específica y difícilmente se podría combinar la información con otros sensores (Roy *et al*., 2002).

Como se mencionó anteriormente, la gran diversidad de vegetación ha dificultado la creación de un procedimiento estándar que asegure una aplicación confiable bajo diferentes condiciones ambientales. Para desarrollar un algoritmo que sea capaz de discriminar las áreas quemadas hay que considerar los siguientes aspectos:

- Características del incendio incluyendo tamaño, severidad, fechas de inicio – terminación y ubicación geográfica.
- Condiciones ambientales del área quemada en el contexto regional incluyendo formas del relieve, tipo de vegetación y condiciones climáticas.
- Imágenes de satélite disponibles considerando su resolución temporal, espacial y espectral.
- Objetivos específicos del estudio, tales como delimitación del perímetro, evaluación de grados de afectación y escala geográfica, entre otros.

Los métodos para discriminar las superficies quemadas se dividen en dos grandes grupos: multitemporales y post-incendio. En el primer caso el método se basa en la detección de cambios ocasionados por el incendio; debido a ello es necesario contar con imágenes antes y después del incendio. La siguiente técnica se basa esencialmente en el comportamiento espectral de la superficie quemada, la cual identifica en comparación con otras cobertura presentes; este proceso requiere solo una imagen. Se ha demostrado que los métodos multitemporales son más efectivos que los post-incendio porque disminuyen la confusión entre coberturas similares (Pereira *et al.*, 1999). Sin embargo, la utilización de una imagen post-incendio requiere un menor costo y tiempo para procesar la información. Así mismo, uno de los aspectos más críticos en el proceso multitemporal son los ajustes radiométricos y geométricos, requeridos para igualar la respuesta espectral y espacial de las imágenes utilizadas. La carencia de estos ajustes puede generar errores de subestimación o sobrestimación de las áreas quemadas.

Existen diversas técnicas para discriminar las superficies quemadas: índices de vegetación NDVI, análisis de componentes principales, clasificación supervisada, diferencia de imágenes y análisis de series de tiempo, entre otros. Se ha demostrado que los índices de áreas quemadas Normal Burn Ratio (NBR; López y Caselles, 1991) y Burned Area Index (BAI; Martín *et al.*, 2005) presentan una mayor capacidad para discriminar superficies quemadas.

Sensores utilizados

Actualmente se encuentra en órbita un buen número de satélites que ofrecen una gama de productos para detectar las áreas quemadas. Por lo que respecta a los

sensores de mediana resolución espacial, el Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) ha incrementado notablemente su aplicación en la detección y cartografía de superficies quemadas en los últimos años, siendo cada vez más los trabajos de investigación en este campo. Su buena resolución espectral, junto a la adecuada resolución temporal y al tamaño del píxel, convierten a MODIS en el sensor más utilizado para analizar fenómenos dinámicos a escala media. De manera complementaria, las imágenes de alta resolución espacial, como Landsat y SPOT, han constituido un apoyo importante para validar, evaluar y describir las áreas quemadas.

Estudio de caso en el sureste de México

Área en estudio

La región sureste de México, comprendida en la ventana MODIS-H09v07, incluye en su totalidad a los estados de Chiapas y Tabasco, así como parte de Campeche y Quintana Roo. Durante 2008, para esta zona, la CONAFOR reportó 643 incendios que afectaron 29 658 ha, siendo el estado de Quintana Roo el más afectado (17 830 ha), seguido por Chiapas (9 711 ha). A nivel nacional, ambos estados fueron considerados entre las diez entidades con mayor superficie afectada por incendios.

Imágenes MODIS

El producto estándar MODIS MCD43B4 se genera cada 16 días, en proyección Sinusoidal, a partir de la combinación de los datos de los satélites Terra y Aqua, con resolución espacial de 1 km, logrando con ello corregir efecto bidireccional y reducir la influencia de nubes y distorsiones atmosféricas. Este producto se creó con la finalidad de optimizar la calidad de los compuestos MODIS de 32 días. La utilidad de los compuestos MCD43B4 para cartografiar las áreas quemadas fue evaluada previamente frente a otros compuestos, obteniendo los mejores resultados (Opazo y Chuvieco, 2007). Debido a ello se consideró una alternativa interesante para Latinoamérica, tomando como área piloto la región sureste de México.

Ajustes AQM2008

Este proceso se inició con la revisión de reportes oficiales (CONAFOR, 2008) con la finalidad de identificar y seleccionar los incendios que hubieran presentado superficies de afectación > 200 ha. Dicha información se utilizó para identificar

visualmente, en los quicklook de Landsat (http://glovis.usgs.gov), al menos un área quemada antes y después del incendio, como se puede ver en la Figura 1.

Posteriormente se verificó la presencia en el correspondiente compuesto MODIS de 16 días. Este proceso constituyó una etapa importante para confirmar o ajustar cada uno de los umbrales del algoritmo AQL2004, obteniendo como resultado un nuevo algoritmo denominado AQM2008. Una vez efectuados los ajustes necesarios, se aplicó a los 46 compuestos que cubren el periodo 2008.

El algoritmo AQL2008 está compuesto por tres fases: *a)* discriminación, *b)* comparación multitemporal y *c)* análisis contextual. Las nubes y las superficies no combustibles se enmascaran antes de iniciar la primera fase para disminuir posibles confusiones. Las nubes se eliminaron utilizando las Bandas 2, 3 y 5:

$$\text{Si } B2 > 0.25 \text{ y } B3 > 0.06 \text{ y } B5/B3 > 0.7,$$

donde:

B1=Banda2: B2=Banda3 y B3= Banda 5.

La máscara de combustible se construyó a partir del mapa de vegetación VCF (Vegetation Continuos Fields; Hansen *et al*., 2004) el cual tuvo que adecuarse a la misma proyección y resolución espacial que los compuestos MODIS de 16 días. La máscara se construyó con la finalidad de reducir las posibles confusiones con los cuerpos de agua y ríos.

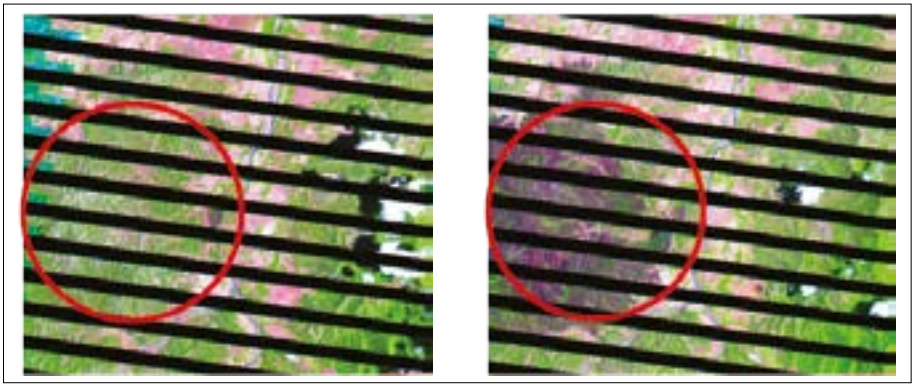


Figura 1. Imágenes Landsat (path 21, row 29), composición RGB (543) donde se presenta una zona quemada antes (9 de abril de 2008; izquierda) y después (25 de abril de 2008; derecha) de un incendio forestal.

La primera fase del algoritmo discrimina los píxeles más afectados por el fuego a partir de umbrales fijos aplicados a los índices de áreas quemadas Normal Burn Ratio (NBR; López y Caselles, 1991) y Burned Area Index (BAI; Martín *et al.*, 2005).

$$NBR = \rho_{NIR} - \rho_{SWIR} / \rho_{NIR} + \rho_{SWIR},$$

donde:

ρ = reflectividad
NIR = infrarrojo cercano
SWIR = infrarrojo medio de onda corta
$BAI = 1/(\rho c_{SWIR} - \rho_{SWIR})2 + (\rho c_{NIR} - \rho_{NIR})2$

donde:

ρc_{SWIR} = reflectividad de un punto de convergencia de área quemada (0.8),
ρc_{NIR} = reflectividad de un punto de convergencia de área quemada (0.2),
ρ = reflectividad en las mismas bandas,
NIR = infrarrojo cercano,
SWIR = infrarrojo medio de onda corta.

La segunda fase compara la diferencia de valores NBR y BAI de los píxeles discriminados en un tiempo dado (t), en relación con el valor del mismos píxel en el compuesto anterior (t-1):

$$BAI_t - BAI_{t-1} \text{ y } NBR_t - NBR_{t-1}.$$

Si la diferencia es mayor que los umbrales establecidos las áreas quemadas se conservan, de lo contrario se eliminan. De esta manera el píxel seleccionado puede ser elegido una sola vez, disminuyendo la posibilidad que un mismo evento sea elegido de manera consecutiva (por lo menos dos veces).

El compuesto de enero 2008 ($_t$) se consideró como el tiempo inicial, cuyos resultados se comparan con el último compuesto de 2007 ($_{t-1}$). Al final de esta fase las áreas quemadas pequeñas (< 3 píxeles = 300 ha) fueron eliminadas.

La tercera fase es un análisis contextual para agregar nuevos píxeles al grupo seleccionado y delimita la superficie afectada por el fuego. Para ello se utiliza un buffer de 3 km (3 píxeles) y el índice BAI con un filtro de paso bajo aplicado en

una ventana de 7 x 7 píxeles. Si el BAI del píxel > (BAI medio * 1.3) y además está dentro del buffer, entonces se considera como áreas quemadas.

Proceso de evaluación

La validación se realizó con imágenes de mayor resolución espacial, particularmente Landsat y SPOT, previas y posteriores a los eventos, en combinación con las estadísticas oficiales de los incendios forestales. Considerando la distribución de los incendios y las áreas quemadas se eligieron tres imágenes al azar; sin embargo, la zona en estudio, por su ubicación geográfica, presenta alta nubosidad durante todo el año, siendo más intensa en la temporada lluviosa de junio a septiembre. Debido a ello, solo fue posible obtener dos pares de imágenes Landsat ETM+ (http://landsat.org): Path 21 - Row 49 del 9 y 25 de abril de 2008 y Path 22 - Row 48 del 3 de marzo y del 2 de mayo de 2008. En complemento se obtuvo un par de imágenes SPOT: K/J 604-318 del 29 de marzo y del 2 de abril de 2008.

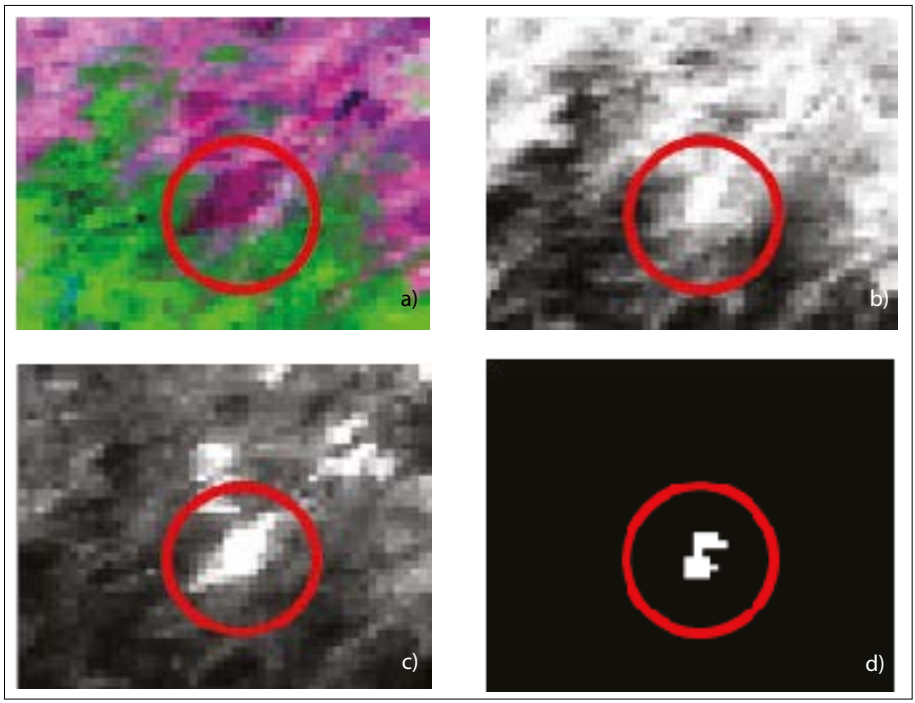


Figura 2. Aplicación del algoritmo al compuesto MDC43B4 2008105, correspondiente a la última semana de abril. En el círculo color rojo se identifica el incendio presentado en la Figura 1, donde a) RGB = 721; b) NBR; c) BAI y d) área quemada identificada por AQM2008.

Con apoyo de la interpretación visual (Roy *et al*., 2002) y utilizando el programa ENVI, se identificaron y delimitaron varios polígonos de áreas quemadas en formato vector. Tales polígonos se sobrepusieron con las áreas quemadas derivadas del algoritmo AQM2008. Esto permitió identificar posibles errores de omisión y comisión. Recientemente se identificaron varias imágenes Landsat TM y SPOT que podrán ser utilizadas para evaluar la confiabilidad del algoritmo a partir de ROI's (Regions of interest) para obtener la superficie coincidente en ambos vectores. Así mismo, la información de cada imagen será organizada en matrices de confusión.

Resultados

Tomando como referencia el algoritmo AQL2004, se construyó uno nuevo para el sureste de México denominado AQM2008, utilizando los compuestos MODIS de 16 días. Los umbrales de ambos algoritmos se presentan en la Tabla 1. Los ajustes para el algoritmo AQM2008 consistieron generalmente en la disminución de umbrales debido a su resolución espacial.

Solamente los primeros 19 compuestos (enero - mayo) presentaron superficies quemadas. Al analizar y comparar los resultados de cada compuesto, de manera consecutiva, se observó que varias regiones presentaban nuevas áreas quemadas, en complemento con áreas que ya habían sido identificadas anteriormente. Dichas repeticiones se atribuyeron a la sobreposición de ocho días entre un compuesto y el siguiente. Sin embargo, un análisis más detallado permitió

Tabla 1. Umbrales establecidos para detectar áreas quemadas

Umbrales	AQL2004	AQM2008
	MODIS 32 días 500 m	MODIS 16 días 1 000 m
BAI mínimo	100	95
NBR mínimo	0.15	0.05
BAI multitemporal	0.6	0.25
NBR multitemporal	160	50
Extracción de semillas	> 5 píxels	> 3 píxels
Buffer	3 km	3 km
Filtro de paso bajo (Kernel Size)	15 x 15	7 x 7

explicar que tales repeticiones muy probablemente están relacionadas con la frecuencia temporal y espacial de las quemas agropecuarias. Debido a ello se consideró conveniente obtener el resultado total de superficie quemada sumando los resultados de los 19 compuestos. Esta estrategia permitió a su vez conocer el número de veces que un píxel había sido considerado como área quemada (frecuencia de quema). Por ejemplo, si en la suma total un píxel presentaba un valor de 1, tal resultado se interpretó como la ocurrencia de un incendio que dejó solo una marca; si presentaba un valor de 2, se consideró que dicho píxel podría haber presentado dos quemas en diferentes fechas.

Siguiendo el criterio anterior, el algoritmo AQM2008 identificó 99 500 ha de superficie quemada entre enero y mayo. De éstas, 60% (59 500 ha) corresponden a Guatemala y Honduras; el 40% (40 000 ha) restante se identificaron en México. De manera complementaria, en toda el área que cubre el Tile H09V07, se observó que 78% de la superficie afectada por el fuego incluye píxeles de clase 1, lo que confirma que solo fueron identificados una vez; 15% de dicha superficie incluye píxeles donde el fuego se presentó en dos ocasiones; el 6% restante incluye píxeles donde las quemas fueron más frecuentes: entre tres y siete ocasiones. Para el caso exclusivo de México, se obtuvieron los siguientes porcentajes: 65% de la superficie incluye píxeles que se quemaron en una ocasión; 24% presentó píxeles donde las quemas se identificaron en dos ocasiones; el 11% restante incluye píxeles con quemas frecuentes: tres a siete ocasiones. Los resultados sugieren que el algoritmo construido tiene buena capacidad para discriminar superficies quemadas recientes ya sea en terrenos de cultivos, pastizales y coberturas forestales (Figura 3).

Como resultado de la validación cualitativa se observó que algunas superficies forestales quemadas no fueron identificadas (errores de omisión); en tanto que las extensas quemas agrícolas y pecuarias fueron identificadas fácilmente, considerándose en ocasiones una sobreestimación (errores de comisión). Esto último muy probablemente se debe a la intensa actividad agropecuaria que caracteriza a esta región.

Discusión

El uso de compuestos MODIS de 16 días permitió construir un algoritmo para detectar superficies quemadas > 300 ha, que afecten terrenos de agropecuarios o forestales. Esto puede considerarse un factor limitante para identificar superficies quemadas de menor proporción. Los registros oficiales reportaron 29 658 ha de

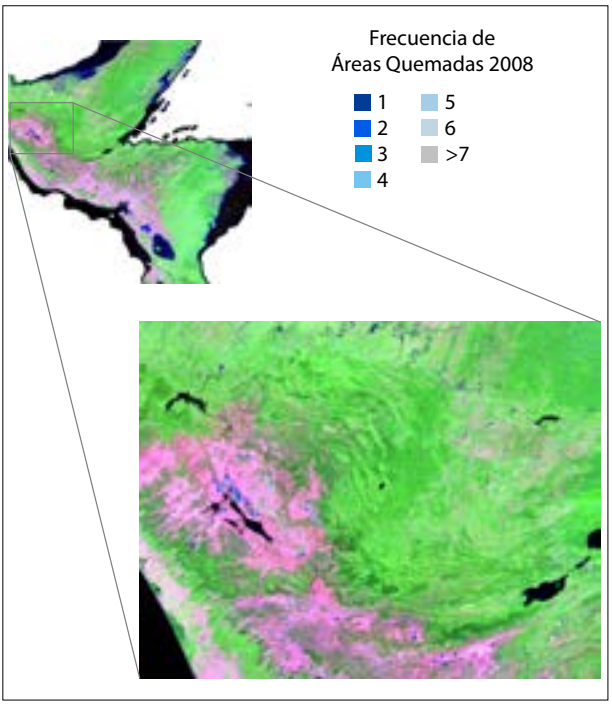


Figura 3. Compuesto RGB (721), MODIS 16 días (MCD43B4A2008017) correspondiente a la última semana de enero de 2008. En tonos de color azul se presentan las áreas quemadas identificadas por el algoritmo AQM2008, clasificados por su frecuencia de ocurrencia.

superficie afectada por incendios forestales durante 2008, de las cuales menos del 10% corresponden a incendios > 300 ha. El algoritmo AQM2008 detectó varias superficies afectadas por grandes incendios forestales, particularmente el ocurrido en la Reserva de El Triunfo entre el 11 y 24 de abril de 2008. Por su dimensión (> 570 ha), dicho incendio fue identificado en las imágenes Landsat ETM+ y en los compuestos MODIS, constituyendo un apoyo importante para ajustar y crear el nuevo algoritmo AQM2008. Sin embargo, en el sureste de México y el resto del país, la mayoría de los incendios afecta superficies < 300 ha. En este sentido el algoritmo AQM2008 y el uso de compuestos MODIS - 16 días constituyen una limitante para detectar áreas quemadas inferiores al umbral mínimo considerado.

Conclusión

El algoritmo AQM2008 y el uso de compuestos MODIS - 16 días constituyen una alternativa para identificar y evaluar las superficies quemadas > 300 ha de manera sistemática a escala regional. Asimismo, se considera que puede ser considerado

un insumo importante para desarrollar un monitoreo sistemático en otras regiones del país y en Latinoamérica. La cartografía generada de áreas quemadas se considera de gran utilidad para elaborar programas de reforestación y vigilancia de quemas agropecuarias.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de los resultados de los proyectos Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudio de los Recursos Naturales (SERENA), Red Latinoamericana de Teledetección de Incendios Forestales (RedLatif) y OTEAR - Observatorio Territorial de Evaluación de Amenazas y Riesgos. Los dos primeros forman parte del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y GOFC-GOLD; el último es un Proyecto PAPIIT (clave IN307410).

Capítulo 11. Observaciones satelitales e *in situ* de un evento de marea roja en la Bahía de Navachiste, Sinaloa, México

Raúl Aguirre Gómez
Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Aída Martínez López
Laboratorio de Fitoplancton, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas,
IPN, La Paz, BCS

Diana C. Escobedo Urías
Departamento de Medio Ambiente, Centro Interdisciplinario de Investigación
para el Desarrollo Integral Regional Unidad Sinaloa, IPN, Guasave, Sinaloa

Introducción

En los últimos años ha habido un aumento en la frecuencia de ocurrencia de mareas rojas en la región costera del estado de Sinaloa. Estos eventos pueden ser una seria amenaza para la salud del ser humano dado que la mayor parte de las algas responsables de las mareas rojas son especies tóxicas (Gárate y Martínez, 1997).

Aun cuando los mecanismos que detonan las mareas rojas no son del todo conocidos, es posible establecer una asociación con factores físicos y biológicos. Entre los factores biológicos de mayor importancia se puede considerar un ambiente rico en nutrimentos provenientes de ríos y escorrentías, los cuales transportan agroquímicos hacia el mar. Esto, combinado con factores físicos como luz y temperatura, puede crear un ambiente adecuado para el desarrollo de diferentes tipos de algas dañinas o no.

La descarga de aguas residuales de tipo urbano o industrial junto con las de granjas de acuacultura crean, en particular, las condiciones favorables para el florecimiento de especies como: *Prorocentrum*, *dentatum* y *minimum*, y de la diatomea *Pseudonitzschia australis* (Cortés y Agraz, 1994). Mee *et al.* (1986) reportaron un incremento en la eutrofización de la región costera de Sinaloa, oca-

sionadas por las descargas de aguas residuales de áreas turísticas y la descarga de aguas de granjas camaronícolas, las cuales favorecen la aparición de cianofitas y dinoflagelados en el ambiente costero.

Esta condición es suficiente pero no necesaria en la explicación de la ocurrencia de mareas rojas. Para que éstas ocurran en la región en estudio es necesario un mecanismo físico de forzamiento tal como la presencia de surgencias eólicas que detonen el florecimiento de algas dañinas. En algunos estudios se ha reportado que los cambios abruptos en la temperatura del mar pueden ser letales para diversos grupos de algas, como las diatomeas, las cuales son vulnerables a cambios en la temperatura del mar de alrededor de 4° C, situación típica en un evento de surgencia eólica, mientras que especies como los dinoflagelados son resistentes a estos cambios. Las especies de dinoflagelados más comúnmente reportadas en la región son, principalmente *Prorocentrum minimum* y *Gymnodinium* sp., las cuales han aparecido con mayor frecuencia desde finales de la década de los años noventa como dominantes en las mareas rojas cercanas a las costas de Mazatlán (Cortés y Agraz, 1994).

Las imágenes satelitales han probado ser una herramienta importante en el monitoreo de las variaciones diarias de la temperatura superficial del mar (TSM) y de la concentración de clorofila *a*. Este tipo de imágenes puede ser utilizado para inferir cambios ambientales, a escala regional, antes, durante y después de la ocurrencia de mareas rojas; tener una visión amplia de estos eventos en espacio y tiempo y evaluar las condiciones óptimas para la ocurrencia de mareas rojas. La presencia de mareas rojas en el Océano Pacífico Oriental Tropical (ETPO, por sus siglas en inglés) ha sido observada y estudiada con imágenes de satélite (Muñoz *et al*., 1991; Peláez, 1987). Aun cuando la detección directa de un evento de marea roja es difícil a causa de su estructura espacial, es posible inferir su presencia mediante la variación de las condiciones térmicas del mar. Estas variaciones pueden ser producidas por el forzamiento del viento en las capas superficiales del océano. Esta interacción produce surgencias eólicas la cual puede detonar florecimientos de dinoflagelados. Aguirre *et al.* (1999) analizaron, usando técnicas de PR, un evento de marea roja en las costas de Mazatlán en 1997. Sus resultados sugieren el forzamiento del viento como el mecanismo físico responsable de la irrupción de un evento de marea roja.

Por otro lado, Beman *et al*. (2005), usando datos SeaWiFS, apuntaron que una consecuencia posible de los eventos de irrigación en el valle del Yaqui era la ocurrencia de una gran cantidad de florecimientos fitoplanctónicos durante el invierno. Estos resultados muestran que la respuesta del fitoplánctones mayor a la

variabilidad del viento durante el invierno-primavera (temporada de surgencias) que a las descargas de agua dado que la temporada de lluvias es en el verano.

Martínez *et al.* (2008) encontraron que los patrones de la TSM en imágenes satelitales sugieren que el forzamiento del viento es el mecanismo responsable de la detonación de florecimientos algales en la zona costera del complejo lagunar de Navachiste. Sin embargo, la utilización de imágenes no basta para explicar la presencia de estos eventos en la región, por lo que es indispensable contar con datos complementarios. Como se mencionó previamente, es necesario tener un ambiente adecuado para el desarrollo de dinoflagelados. Para ello, son necesarias las mediciones *in situ* para cuantificar los nutrientes presentes en la región, los cuales son transportados por las corrientes a lo largo de la costa. Por consiguiente, los datos *in situ* data son útiles para validar y calibrar la información satelital.

En el periodo comprendido entre el 19 de abril al 5 de mayo de 2000, tuvo lugar un evento de marea roja en las costas de Sinaloa. La cobertura del evento fue de aproximadamente 67 km de largo por 13 de ancho, cerca del complejo lagunar San Ignacio-Navachiste-Macapule, que penetró el sistema a finales de abril.

El objetivo de este trabajo es analizar la ocurrencia de una marea roja en la bahía de Navachiste, Sinaloa, utilizando imágenes satelitales de color y temperatura superficial del mar y observaciones *in situ*. Este análisis permitirá un mayor entendimiento sobre los mecanismos que dan lugar a eventos de marea roja.

Área en estudio

La bahía de Navachiste forma parte del sistema lagunar Navachiste-San Ignacio-Macapule inserta en el complejo de lagunas costeras localizadas en la parte norte de la planicie costera del estado de Sinaloa (25°17' – 25°40' N; 108°25'-109°02' W). El sistema tiene una extensión aproximada de 45 km a lo largo de la costa y una superficie cercana a las 27 000 ha, incluyendo las lagunas (Berlanga y Ruiz, 2002). El complejo tiene una interacción permanente con el Golfo de California a través de dos bocas que le proporcionan un ambiente marino la mayor parte del año. El río Sinaloa descarga en el sistema lagunar San Ignacio-Navachiste y tiene una fuerte interacción.

De acuerdo con el INEGI (2000) el área en estudio tiene un clima seco y cálido y está situado en una región semi-árida y sub-húmeda, con lluvias en verano de julio a octubre. Las fuentes principales de contaminación en el complejo lagunar son las descargas de aguas negras municipales de Guasave, el centro

urbano de mayor importancia en la zona, drenaje de los campos agrícolas, el cual transporta fertilizantes e insecticidas; drenaje de las granjas camaronícolas, el cual fluye en el sistema acarreando nutrientes orgánicos, especialmente durante la época de cosecha (Ruiz y De la Lanza, 1999).

En general, esta región se caracteriza por tener una alta concentración de pigmentos, como se ha observado en imágenes satelitales, Santamaría *et al*. (1994), utilizando imágenes del sensor CZCS, encontraron un valor promedio de 3.69 mg m^{-3} en la concentración de pigmentos durante el invierno y de 0.49 mg m^{-3} durante el estiaje.

Materiales y métodos

Datos in situ

Se realizaron cuatro cruceros de muestreo en noviembre de 1999, y en enero, marzo y abril de 2000. El último muestreo fue coincidente con el evento de marea roja ocurrido en el periodo del 19 de abril al 5 de mayo. Las mediciones *in situ* en la plataforma continental se llevaron a cabo en 25 estaciones de muestreo (Figura 1), a tres diferentes profundidades (superficie, 2 m y fondo). Los valores de temperatura, salinidad, pH, y oxígeno disuelto fueron medidos con un ana-

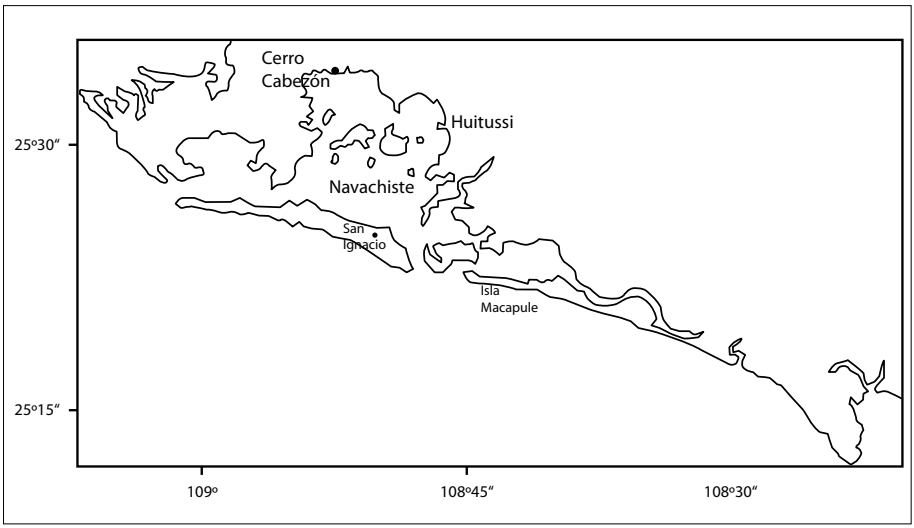


Figura 1. Área en estudio.

lizador de calidad de agua (Horiba, modelo U-10); la transparencia del agua fue estimada con un disco Secchi; y las mediciones de profundidad se realizaron con una eco-sonda.

Adicionalmente, se colectaron muestras de agua para analizar nutrientes tales como amoniaco (NH_4), nitratos (NO_3), nitritos (NO_2), fosfatos (PO_4) y silicatos (SiO_3) y para determinar los sólidos suspendidos totales (SST), materia orgánica particulada (MOP), clorofila *a* y fitoplancton. La colecta y el análisis de las muestras de fitoplancton fueron realizados con el método Uthermöl. La biomasa fitoplanctónica fue determinada mediante la cuantificación de la clorofila *a* y feo-pigmentos (Strickland y Parsons, 1972).

Observaciones satelitales

Las imágenes satelitales de color y temperatura superficial del mar fueron recibidas y procesadas en el Laboratorio de Análisis Geoespacial del Instituto de Geografía (LAGE-UNAM). Las imágenes de color obtenidas con el sensor SeaWiFS fueron transformadas a mapas de concentración de clorofila *a* (+ feopigmentos) usando el programa SeaDAS de la NASA.

$$\mathrm{Clo_a} = -0.40 + 10^{(0.341 - 3.001X + 2.811X^2 - 2.041X^3)},$$

donde $\mathrm{Clo_a}$ es la concentración de clorofila *a* (mg m^{-3}) y X expresa el cociente entre las bandas espectrales 3 y 5 del sensor SeaWiFS.

$$X = \log_{10}\left(\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)}\right),$$

donde $R_{rs}(\lambda)$ es la reflectancia en la banda λ.

Por su parte, las imágenes de TSM fueron derivadas de los datos del sensor NOAA-AVHRR aplicando el algoritmo de doble ventana (MCSST) propuesto por McClain *et al.* (1985) e implementado en el sistema TERASCAN (SeaSpace Corporation, ltd).

$$TMS = 1.017432T_{11} + 2.139588(T_{11} - T_{12}) - 283.21,$$

donde T_{11} y T_{12} son las temperaturas de brillo calculadas a partir de las radiancias expresadas en grados Kelvin. TSM es la temperatura superficial del mar calculada mediante el algoritmo MCSST y expresado en grados centígrados.

Resultados

Datos in situ

Los datos analizados del 25 de abril de 2000, tres puntos de muestreo presentaron valores de concentración muy altos del alga *Prorocentum minimum*. Hasta la fecha, el evento reportado en este trabajo ha sido uno de los más extendidos y con la concentración de dinoflagelados más alta. La concentración de microalgas en la superficie varió entre 8 600 y 9 600 células/ml, de los cuales 7 665 células/ml correspondieron a *Prorocentrum minimum*, lo cual equivale a una concentración de clorofila *a* entre 73 y 106.5 mg/m^3, siendo la especie dominante. Esta alga es común en estuarios y lagunas costeras y en algunos estudios han sido reportados efectos letales en peces y moluscos, y secuelas peligrosas en seres humanos (Day *et al*., 1989; Cortés y Agraz, 1994).

Prorocentrum minimum contiene pigmentos rojos que confieren una coloración rojiza-caoba a las aguas costeras y estuarinas; adicionalmente se identificaron tres especies potencialmente tóxicas: *Pseudonitzschia* cf *multiseries*, *Pseudonitzschia* cf *australis* y *Dinophysis acuminata*. Las dos primeras pertenecen a la clase de las diatomeas y pueden producir toxinas amnésicas (ASP), mientras que el dinoflagelado *Dinophysis acuminata* ha sido asociado con la producción de toxinas diarreicas (DSP).

La Tabla 1 muestra los valores promedio de las variables fisicoquímicas medidas en la mancha de la marea roja (Figura 2).

Temperatura superficial del mar

Las imágenes de TSM muestran variaciones térmicas en el área en estudio durante abril de 2000. A principios de mes se observaron valores cercanos a 29° C en la

Tabla 1. Variables físico-químicas en la columna de agua medidas en la mancha principal de la marea roja frente a la costa del Municipio de Guasave, Sinaloa, el 25 de abril de 2000

Prof. (m)	T (°C)	pH	%SAT o_2	S (%)	OD (mg/l)	TSS (mg/l)
0	22.7	9.23	229	35.6	15.9	47.22
-4	22.3	9.11	206	35.6	14.54	42.08
-8.1	19.4	8.3	29	35.5	2.18	93.96
Prof. (m)	NO_3 (µM)	NO_2 (µM)	NH_4 (µM)	SiO_3 (µM)	PO_4 R (µM)	PO_4 T (µM)
0	0.15	0.08	0.4	5.23	0.8	0.98
-4	0.32	0.18	0.4	2.16	0.35	0.92

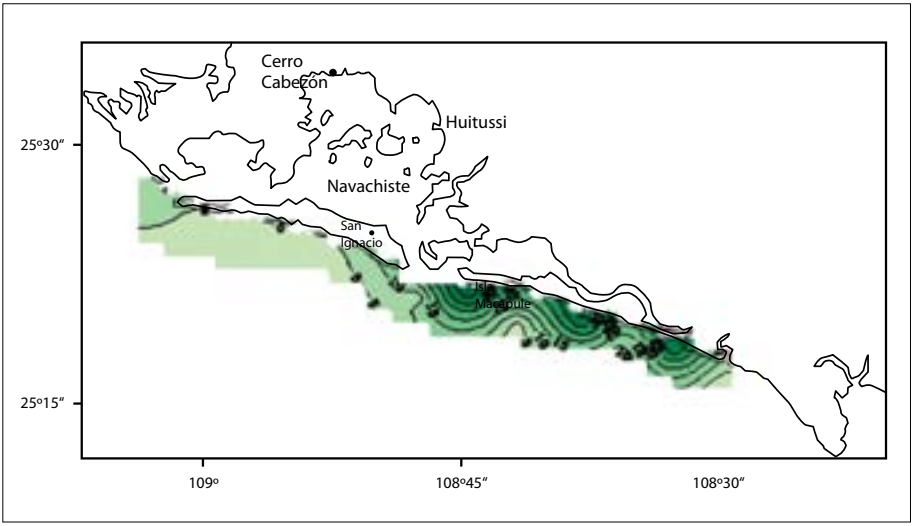


Figura 2. Extensión de la mancha de marea roja en el sistema lagunar.

costa del sistema lagunar San Ignacio-Navachiste-Macapule. A mediados de mes se observó un decremento en las imágenes de TSM de aproximadamente 3° C. Esta disminución en la TSM puede asociarse al forzamiento del viento sobre la región. Aun cuando el forzamiento del viento no fue lo suficientemente grande, fue constante en dirección e intensidad por varios días (Figura 3). Hacia finales de abril se restablecieron las condiciones térmicas iniciales, coincidiendo con el florecimiento de la marea roja.

Se ha observado que cambios abruptos en la TSM pueden afectar a algunos tipos de algas tales como las diatomeas, mientras que dinoflagelados presentan

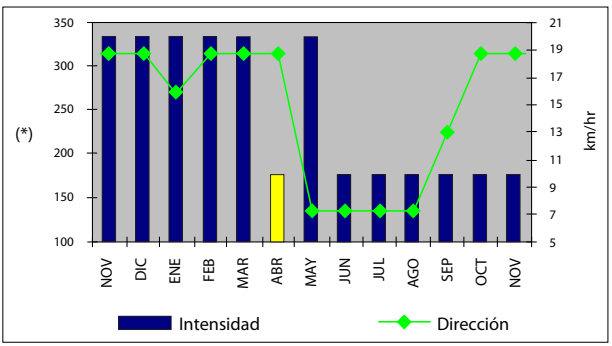


Figura 3. Valores mensuales del campo de viento en el año 2000.

una mayor resistencia a las variaciones de temperatura (Lee, 1992). Esto es particularmente cierto para el caso de *Prorocentrum minimum* que fue la especie dominante en el área. Las Figuras 4 y 5 muestran las variaciones en la TSM durante abril de 2000.

La Figura 4a es una imagen correspondiente al 24 de abril de 2000 e ilustra la respuesta de la TSM al esfuerzo sostenido del viento de los días previos y muestra aguas relativamente frías en la zona costera sugiriendo una surgencia de aguas profundas. Climatológicamente, en el periodo invierno-primavera la región es dominada por vientos fríos del NO procedentes del continente. La persistencia del viento produce la surgencia de tipo eólica. La TSM en la zona costera frente al sistema lagunar es cercana a los 22° C (tonos azules), mientras que hacia la zona oceánica se observa un valor promedio de la TSM de 26.5° C (tonos naranja). En la Figura 4b se observa el gradiente térmico en el área en estudio.

Los datos *in situ* indican el inicio de la marea roja a partir del 25 de abril de 2000, alcanzando su máximo hacia finales de mes, coincidente con el incremento en la TSM sobre el sistema lagunar (Figura 5a). En el mapa de la TSM de 30 de abril (Figura 5a) es evidente la condición isotérmica de la región, promediando una temperatura de 24° C, las variaciones mínimas alrededor de esta valor se aprecian claramente en la Figura 5b.

Datos SeaWiFS

La imagen del sensor SeaWiFS del 20 de abril muestra valores relativamente bajos de la concentración de clorofila *a* (1 - 10 mg m^{-3}) en la región del sistema lagunar (Figura 6). En contraste, la imagen correspondiente al 25 de abril de 2000 presenta valores altos en la concentración de clorofila *a*, cercanos a los 64 mg m^{-3}, coincidiendo con el florecimiento de la marea roja (Figura 7). Es importante remarcar que la dominancia de *Prorocentrum minimum* es posible establecerla solo con los datos *in situ*, la imagen de satélite no discrimina los diferentes grupos de algas coincidiendo en el sitio.

Conclusiones

Los datos *in situ* sugieren que la marea roja en el sistema lagunar San Ignacio-Navachiste-Macapule fue un fenómeno local originado por una alta concentración de nutrientes procedentes del río Sinaloa y la laguna Macapule, aunado a

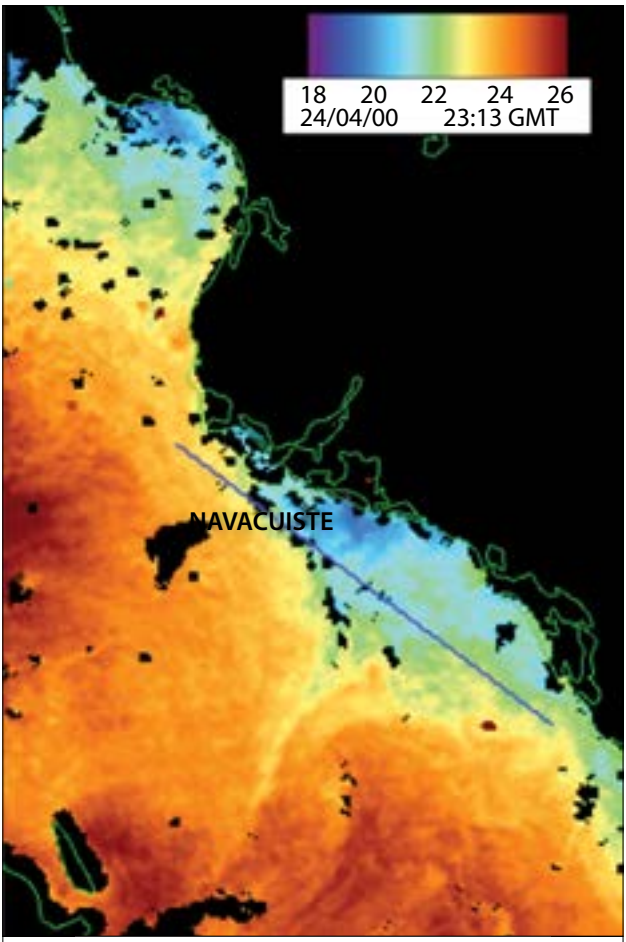


Figura 4a. Mapa de la TSM correspondiente al 24-04-2000.

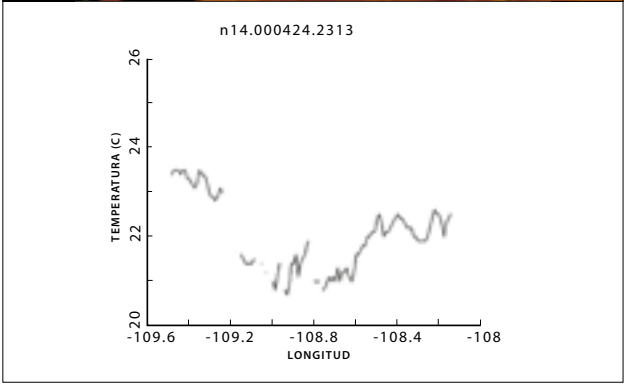


Figura 4b. Variación de la TSM a lo largo de un transecto y a lo largo del sistema lagunar (24-04-2000).

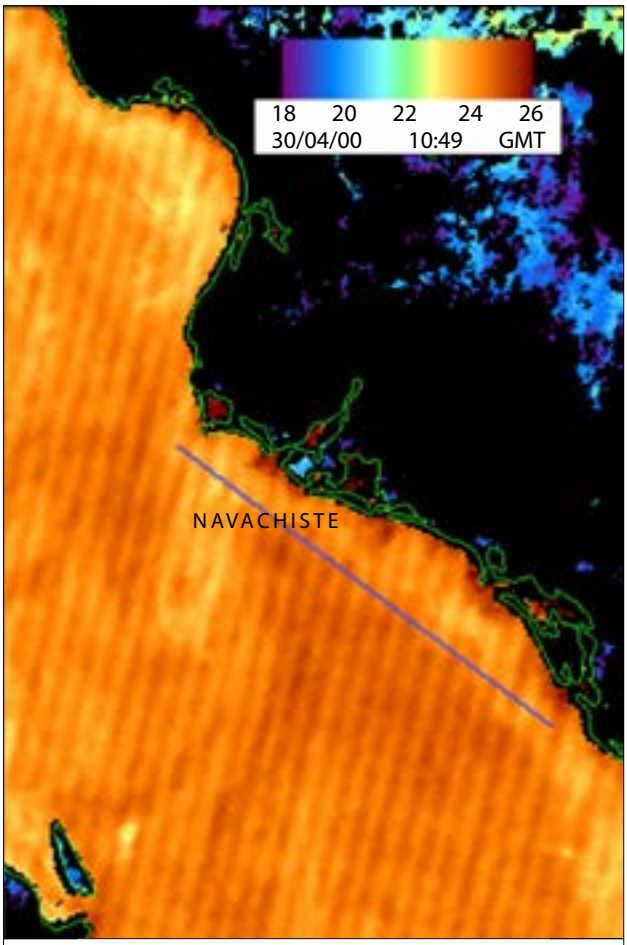


Figura 5a. Mapa de la TSM correspondiente al 30-04-2000.

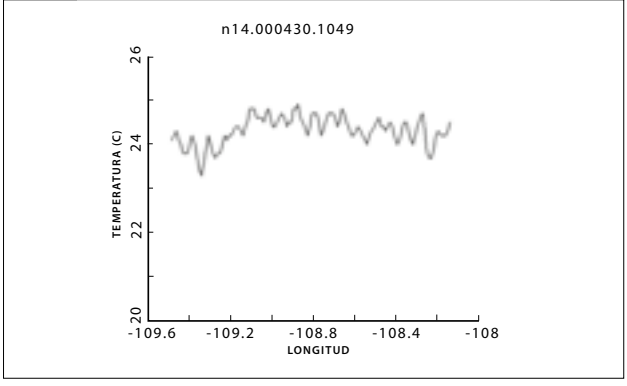


Figura 5b. Variación de la TSM a lo largo de un transecto y a lo largo del sistema lagunar (30-04-2000).

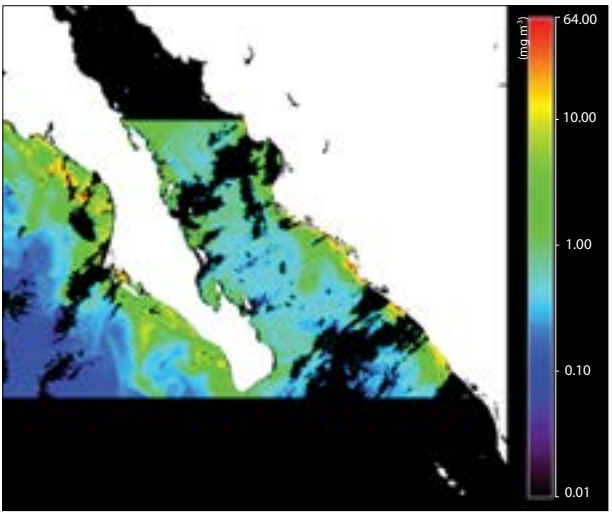


Figura 6. Imagen SeaWiFS correspondiente al 22 de abril de 2000.

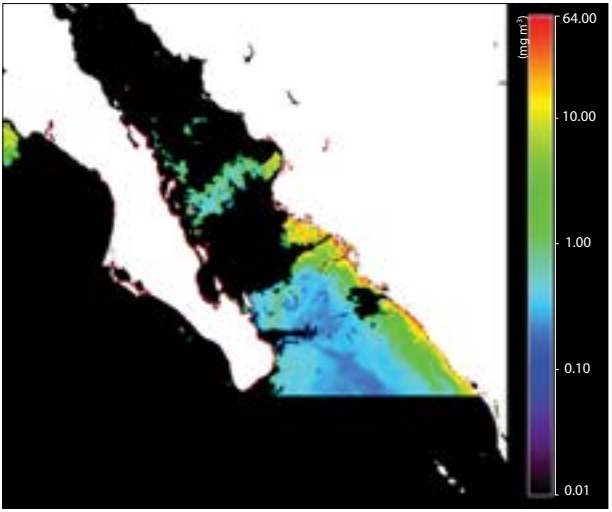


Figura 7. Imagen SeaWiFS correspondiente al 27 de abril de 2000.

un aumento en el proceso de re-mineralización ocasionado por la elevación de la temperatura en la columna de agua (Valiela, 1995). Los datos indican la presencia de varias especies de dinoflagelados con el predominio de *Prorocentrum minimum*.

Las condiciones físico-biológicas en marzo de 2000, previas al florecimiento de la marea roja, se caracterizaron por vientos de baja intensidad, una alta con-

centración de nutrientes y corrientes fluyendo en la dirección S-N. Las condiciones a finales del mes de abril de 2000 fueron diferentes: aumento de temperatura, la aparición de altas concentraciones de clorofila y una importante intrusión de nutrientes procedente del sur. La presencia de nutrientes durante el periodo invierno-primavera es ocasionada en gran medida por fertilizantes usados en las zonas agrícolas costeras. Estos agroquímicos son transportados a la zona costera por la descarga de aguas residuales en el sistema lagunar en los esteros Coloradito y Babaraza y el río Sinaloa.

Las imágenes satelitales de TSM sugieren la presencia de un evento de surgencia como el mecanismo responsable del afloramiento de la marea roja. Las imágenes de color del mar muestran, a su vez, las variaciones en las concentraciones de clorofila *a*, en particular la imagen del 25 de abril mostró altas concentraciones de este pigmento, las cuales son coincidentes con la marea detectada en los muestreos *in situ*.

REFERENCIAS

Addison, P.S. (1997), *Fractal and chaos. An illustrated course*, Institute of physics publishing, Bristol and Philadelphia.

Aguirre Gómez, R. (2002), *Los mares mexicanos a través de la percepción remota*, Temas Selectos de Geografía de México (III.1), Instituto de Geografía-UNAM, Plaza y Valdés, México.

Aguirre Gómez, R. (2007), "Temperatura superficial del mar y concentración de clorofila a", *Nuevo Atlas Nacional de México*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Aguirre Gómez, R. (coord.; 2009), *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*, Geografía para el siglo XXI, Serie libros de Investigación, núm. 5, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Aguirre Gómez, R., R. Álvarez and O. Salmerón García (1999), "Red tide evolution in the Mazatlán Baya rea from remotely sensed sea surface temperaturas", *Geofísica Internacional*, vol. 38, pp. 63-71.

Aguirre Gómez, R., O. Salmerón García and R. Álvarez (2003), "Effects of NSO off the southwest of Mexico, 1996-1999", *Geofísica Internacional*, pp. 377-388.

Álvarez, R., O. Salmerón García y R. Aguirre Gómez (2001), "Las imágenes de satélite ayudaron a evaluar los efectos de El Niño Oscilación del Sur en el Pacífico mexicano, en el periodo 1997-1998", *Los efectos del fenómeno El Niño en México 1997-1998*, CONACYT, México.

Anderson, A. N., A. B. McBratney and E. A. FitzPatrick (1996), "Soil mass, surface and spectral dimensions estimates from thin section photograph", *Soil Science Society American Journal*, no. 60, pp. 962-969.

Anderson, A. N., A. B. McBratney and J. W. Crawford (1998), "Applications of fractal to soil studies", in Sparks, D.L. (ed.), *Advances in Agronomy*, no. 63, Academic Press, pp. 2-76.

Andrle, R. F. (1964), *A biogeographical investigation of the Sierra de Tuxtlas in Veracruz, Mexico*, Phd Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge.

Angeli, M. G., A. Pasuto and S. Silvano (2000), "A critical review of landslide monitoring experiences", *Engineering Geology*, vol. 55, pp. 133-147.

Archarya, G., T. Cochrane, T. Davies and E. Bowman (2011), "Quantifying and modeling pos-failure yields from laboratory-scale soil erosion and shallow landslide experiments with silty loess", *Geomorphology*.

ASPRS (2007), *Planimetric Feature Coordinate Accuracy Requirement (Ground X or Y in Meters) for Well-Defined Points*, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing [http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-1-1005/c-4.pdf: con acceso en enero de 2012].

ASPRS (2011), *Planimetric Feature Coordinate Accuracy Requirement (Ground X or Y in Meters) for Well-Defined Points* [http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-1-1005/c-4.pdf: con acceso en enero de 2012].

ASTRIUM (2012), [http://www.astrium-geo.com/files/pmedia/public/r146_9_pricelist_spot_en_2011.pdf: consultada en enero de 2012].

Atkinson, P. M. and R. Massari (1998), "Generalized linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy", *Computers and Geosciences*, no. 24, pp. 373-385.

Ayelew, L. and H. Yamagishi (2005), "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan", *Geomorphology*, no. 65, pp. 15-31.

Bai, S. B., J. Wang, G. N. Lü, P. G. Zhou, S. S. Xu (2010), "GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China", *Geomorphology*, no. 115, pp. 23-31.

Barsch, D. (1996), *Rockglaciers*, Springer, Berlin.

Behrenfeld, M. J. and P. G. Falkowski (1997), "A consumer´s guide to phytoplankton primary productivity models", *Limnology and Oceanography*, vol. 42, pp. 1479-1492.

Belterman, R. H. B. and l. E. M. De Boer (1990), "A miscellaneous collection of bird karyotypes", *Genetica*, no. 83, pp. 17-29.

Beman, J. M., K. R. Arrigo and P. A. Matson (2005), "Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean", *Nature*, vol. 434, pp. 211-214.

Berlanga Robles, C. A. and A. Ruiz Luna (2002), "Land use mapping and change detection in the coastal zone of northwest Mexico using remote sensing techniques", *Journal of Coastal. Research*, no. 18, pp. 514-522.

Bermúdez, R. y U. Martínez (2001), *Despliegue y almacenamiento de datos para un sistema de adquisición de imágenes aéreas*, tesis de Licenciatura (Ingeniería en Computación), Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Bernstein, R. L. (1982), "Sea surface temperature estimation using the NOAA 6 satellite AVHRR", *Journal of Geophysical Research*, vol. 87C, pp. 1761-1778.

Beven, K. J. and M. J. Kirkby (1979), "A physically based variable contributing area model of basin hydrology", *Hydrological Sciences Bulletin*, no. 24, pp. 43-69.

Borga, M., G. D. Fontana and F. Cazorzi (2002a), "Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index", *Journal of Hydrology*, no. 268, pp. 56-71.

Borga, M., G. D. Fontana, C. Gregoretti and L. Marchi (2002b), "Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability", *Hydrological Processes*, no. 16, pp. 2833-2851.

Bozzano, F., C. Cherubini, M. Floris, M. Lupo and F. Paccapelo (2002), "Landslide phenomena in the area of Pomarico (Basilicata-Italy): methods for modeling and monitoring", *Physics and Chemistry of the Earth*, no. 27, pp. 1601-1607.

Brenning, A. (2003), "La importancia de los glaciares de escombros en los sistemas geomorfológico e hidrológico de la Cordillera de Santiago: fundamentos y primeros resultados", *Revista de Geografía, Norte Grande*. Pontífica Universidad Católica de Chile, núm. 30, pp. 7-22.

Brower, L. P. *et al*. (2002), "Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the monarch butterfly in Mexico: 1971-1999", *Conservation Biology*, vol.16, no. 2, pp. 346-359.

Brown, L. (1974), "Data required for effective study of raptor populations", *Proc. of the Conference on raptor conservation techniques*, Fort Collins, Colorado, Raptor Research Report No. 2.

Brown, L. H. and D. Amadon (1989), *Eagles, hawks and falcons of the World*, Second Edition, The Wellfleet Press, Secaucus, NJ.

Burton, P. (1989), *Birds of Prey*, Gallery Books, New York.

Bull, J. L. and J. Farrand Jr. (1995), *National Audubon Society Field Guide to North American Birds. Eastern Region*, The Audubon Society field guide series, Alfred A. Knopf Inc., New York.

Butler, M. A. J. (1990), *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio*, documento técnico de pesca 295, FAO.

Can, T., H. A. Nefeslioglu, C. Gokceoglu, H. Sonmez and T. Y. Duman (2005), "Susceptibility assessments of shallow earth flows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses", *Geomorphology*, no. 72, pp. 250-271.

Carranza, J. *et al.* (2003), "Monitoring the natural protected areas of Mexico with airborne digital cameras", *ASPRS. 19th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and Airborne Imaging for Resource Assessment*, Oct. 6-8, Logan, Utah.

Castellanos Abella, E. A. and C. J. Van Westen (2008), "Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba", *Geomorphology*, *no.* 94, pp. 453-466.

CCT_Matlab (2012), *Camera Calibration Toolbox for Matlab* [http://www.mathworks.com/matlabcentral/linkexchange/links/1092-camera-calibration-toolbox-for-matlab].

Carranza, J., A. Peralta Higuera, J. Prado, V. Salazar, A. Alejo y J. L. Palacio (2003), *Monitoring the natural protected areas of Mexico with airborne digital cameras,* ASPRS. 19th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and Airborne Imaging for Resource Assessment, Logan, Utah, USA, Oct. 6-8.

Casana, J. and J. Cotheren (2008), "Stereo analysis, DEM extraction and orthorectification of CORONA satellite imagery: archaeological applications from the Near East", *Antiquity*, no. 82, pp. 732-749.

Chen, J., P. J. Gong, C. He, R. Pu and P. Shi (2003), "Land use/cover change detection using improved change vector analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, no. 4, pp. 369-379.

Chinnayakanahalli, K., D. G. Tarboton and R. T. Pack (2003), "An objective method for the intercomparison of terrain stability models", *Eos Transaction*, American Geophysical Union 84 (46) (Fall Meeting. Suppl., Abstract H31C-0480).

Chunyang, H. and X. Dingyong (2008), "Improving the Normalized Difference Built-up Index to map urban build-up areas by using a semiautomatic segmentation approach", *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [http://www.igarss2008.org/Abstracts/pdfs/2871.pdf].

Chuvieco, E., S. Opazo, W. Sione, H. Del Valle, J. Anaya, C. Di Bella, I. Cruz I., L. Manzo, G. López, N. Marí, F. González, F. Morelli, A. Setter, I. Csiszar, J. Karpandegui, A. Bastarrika and R. Libonati (2008), "Global burned land estimation in Latin America using Modis Composite Data", *Ecological Applications,* no. 18, pp. 64-79.

Clerici, A., S. Perego, C. Tellini and P. Vescovi (2002), "A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method", *Geomorphology*, no. 48, pp. 349-364.

Cole, J. and C. Villacastin (2000), "Sa surface variability in the northern Benguela upwelling system, and implicatuions for fisheries research", *J. Remote Sensing*, vol. 21, pp. 1597-1617.

Collet, B., J.-F. Parrot and H. Taud (2000), "Orientation of absolute African plate motion revealed by tomomorphometric analysis of the Ethiopian dome", *Geology*, vol. 28, no. 2, pp. 1147-1149.

CONAFOR (2008), *Reportes de incendios 2008*, Comisión Nacional Forestal, México [http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales forestales/incendios/index.html].

CONAGUA (2010), *Nivelación de Precisión del Valle de México, Zona Lago de Texcoco, 2006*, Zona Valle de Chalco, Comisión Nacional del Agua, Estado de México.

Cortés, R. y C. M. Agraz (1994), *Presencia de Prorocentrum minimum (Pav) schiller en estanques para cultivo de camarón*, Universidad Autónoma de Sinaloa, núm. 13, pp. 11-16.

Crozier, M. J. (1973), "Techniques for the morphometric analysis of landslips", *Zeitschrift fur Geomorphologie*, vol. 17, no. 1, pp. 78-101.

Dai, F. C., C. F. Lee and Y. Y. Ngai (2002), "Landslide risk assessment and management: an overview", *Engineering Geology*, no. 64, pp. 65-87.

Day, J. W., C. A. S. Hall, W. M. Kemp and A. Yáñez Arancibia (1989), *Estuarine Ecology*, Wiley, New York.

Deb, S. K. and A. I. El-Kadi (2009), "Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events", *J. of Geomorphology*, no. 108, pp. 219-233.

DeGraaf, R. M. and J. H. Rappole (1995), *Neotropical migratory birds*, Comstock Publishing Associates, Ithaca and London.

Dehn, M. and J. Buma (1999), "Modelling future landslide activity based on general circulation models", *Geomorphology*, no. 30, pp. 175-187.

DHI (2011), *MIKE-URBAN software*, Danish Hydrological Institute.

Delorme, A. (2009), *Produire un modèle numérique d'elevation à l'aide du DEM extraction module d'ENVI*.

DeMaris, A. (1992), "Logit modeling: practical applications sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, series no. 07-086. Newbury Park, CA: Sage Publications.

Demoulin, A. and C. F. Chung (2007), "Mapping landslide susceptibility from small datasets: a case study in the Pays de Herve (E Belgium)", *Geomorphology*, no. 89, pp. 391-404.

Dewolf, Y. et G. Bourrié (2008), "Les formations superficielles. Genèse – Typologie –Classifications – Paysages et environnements – Resources et Risques", *Ellipses*, Edition Marketing, Paris.

Dietrich, W. E., D. Bellugi and R. Real de Asua (2001), "Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management", in Wigmosta, M. S. and S. J. Burges (eds.), *Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas*; American Geophysical Union, Water Science and Application 2, pp. 195-227.

Dietrich, W. E. and D. R. Montgomery (1998), SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential, NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) Technical Report.

Di Gregorio, S., R. Rongo, C. Siciliano, M. Sorriso Valvo and W. Spataro (1999), "Mount Ontake landslide simulation by the Cellular Automata model SCIDDICA-3", *Physics and Chemistry of the Earth*, Part A: Solid Earth and Geodesy, no. 24, pp. 97-100.

Dirzo, R. (1987), *Propuesta para la creación de un parque ecológico para la investigación y educación en Los Tuxtlas, Veracruz*, SEDUE, México.

Dirzo, R. (1991), "Rescate y restauración ecológica de la selva de Los Tuxtlas", *Ciencia y Desarrollo*, núm. 17, pp. 33-45.

Dirzo, R. y A. Miranda (1992), "El límite boreal de la selva tropical húmeda en el continente Americano: contracción de la vegetación y solución de una controversia", *Interciencia*, núm. 16, pp. 240-247.

Dirzo, R. and M. C. García (1992), "Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a neotropical area in southeast Mexico", *Conservation Biology*, no. 6, pp. 84-90.

DOF (2000), *Decreto de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca*, Diario Oficial de la Federación [http://dof.gob.mx/index.php?year=2000&month=11&day=10 Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, 10 de nov. de 2000 (con acceso: 4 marzo 2010)].

Domínguez Morales, L. (2008), *El deslizamiento del 4 de noviembre de 2007 en la comunidad Juan de Gravalda, municipio de Ostuacan, Chiapas, y su relación con el frente frío n° 4*, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), internal report.

DxO Laboratories (2012), URL: http://www.dxo.com/intl/photo (con acceso en enero de 2012).

ERMEXS (2012) [http://www.aserca.gob.mx/artman/uploads/0810000001305.pdf (consultada 20/01/2012)].

ESRI (2010), *ArcGIS software*, Environmental System Research Institute.

Eva, H. and E. F. Lambin (1998), "Remote sensing of biomasa burning in tropical regions: sampling issues and Multisensor approach", *Remote Sensing of Environment*, no. 64, pp. 292-315.

Everitt, J. H. and D. E. Escobar (1995), "Using video imaging technology for remote sensing of natural resources", *VII SELPER*, noviembre, Puerto Vallarta, Jalisco, México, pp. 753-773.

Everitt, B. S., S. Landau and M. Leese (2001), *Cluster analysis*, Arnold, New York, Oxford University, London.

Falconer, K. (1995), *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*, Willey, New-York.

Ferguson-Lees, J. and D. A. Christie (2006), *Raptors of the World*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

Field, A. (2005), *Discovering statistics using SPSS for windows: advanced techniques for beginners (Introducing Statistical Methods)*, second ed., Sage Publications, Thousand Oaks, CA.

Flores, V. O. y P. Gerez (1988), *Conservación en México: síntesis sobre vertebrados terrestres, vegetación y uso del suelo*, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Conservación Internacional, México.

Forman, R. T. T. and M. Gordon (1986), *Landscape Ecology*, Wiley, New York.

Fort, M. and J.-P. Peulvast (1995), "Catastrophic mass-movements and morphogenesis in the Peri-Tibetan Ranges: examples from West Kunlun, East Pamir and Ladakh", in Slaymaker O. (ed.), *Steepland Geomorphology*, Wiley, Chichester, pp. 171-198.

Fox, N. (1995), *Understanding the bird of prey*, Hancock House Publishers.

FRA (2005), *Term and definitions. Global Forest Resources Assessement Update*, Forestry Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Frankel, O. H. and M. E. Soulé (1981), *Conservation and evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, England.

Freij-Ayoub, R., J. Underschultz, F. Li, C. Trefry, A. Hennig, C. Otto and K. McInnes (2007), *Simulation of coastal subsidence and storm wave inundation risk in the Gippsland Basin***,** Report number 07-003. Wealth from Oceans Flagship.

Gárate Lizárraga, I. y L. A. Martínez (1997), "Primer registro de una marea roja de *Prorocentrum mexicanum* (Prorocentaceae) en aguas del Golfo de California", *Revista de Biología Tropical*, núm. 45, pp. 1263-1271.

Giron, B. A., B. A. Millsap, K. W. Cline and D. M. Bird (eds.; 1987), *Raptor Management Techniques Manual*, National Wildlife Federation, Washington, D.C.

Gobierno del Estado de Veracruz (1991), *Los Tuxtlas: propuesta para su conservación y desarrollo integral*, México.

González, C. (2002), "Pigmentos fotosintéticos" [http://www.botanica.cnba.uba.ar/Trabprac/Tp6/Pigmentos.htm; consultado 16 de marzo de 2009].

González Díez, A., J. Remondo, J. R. Díaz de Terán and A. Cendrero (1999), "A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides", *Geomorphology*, no. 30, pp. 95-113.

González Silvera, A. (2004), "Satellite observations of mesoscale eddies in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific)", *Deep-Sea Research*, Elsevier, pp. 587-600.

Gorte, B. G. H. and W. Koolhoven (1990), "Interpolation between isolines based on the Borgefors distance transform", *ITC Journal*, no. 3, pp. 245-247.

Guzzetti, F., A. Carrara, M. Cardinali and P. Reichenbach (1999), "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy", *Geomorphology*, no. 31, pp. 181-216.

Guzzetti, F., B. D. Malamud, D. L. Turcotte and P. Reichenbach (2002), "Power-law correlations of landslide areas in central Italy", *Earth and Planetary Science Letters*, no. 195, pp. 169-183.

Graf Montero, S., E. Santana, E. J. Peláez y B. F. Benz (1995), "La reserva de la biosfera Sierra de Manantlán: un balance de ocho años de gestión", *Revista Universidad de Guadalajara*, "Conservación Biológica en México", México.

Graham, R.W. and J. P. Mills (2000), "Small format digital cameras for aerial survey: where are we now?", *Photogrammetric Record*, vol. 16, no. 96, pp. 905-909.

GRASS Development Team (2012), *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS)*, GNU (General Public License. http://grass.osgeo.org).

Hagan, J. M. and D. W. Johnston (eds.; 1992), *Ecology and Conservation of Neotropical Migrant Landbirds*, Smithsonian, Washington, D.C.

Hammond, C., D. Hall, S. Miller and P. Swetik (1992), *Level I Stability Analysis (LISA) documentation for version 2.0*, General Technical Report INT-285, US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, UT.

Hansen, M., R. DeFries, J. R. Townshend, M. Carroll, C. Dimiceli and R. Sohlberg (2004), *500m MODIS Vegetation Continuous Field*, University of Maryland, Maryland [http://glcf.umiacs.umd.edu/data/modis/ (consultado 10 de septiembre 2009)].

Hashimoto T., M. Takagi, K. Kajiwara and Ch. Fujino (eds.; 1993), *Remote Sensing Note*, Japan Association on Remote Sensing, Nihon Printing Co., Chiyodaku, Tokio, Japan.

HEC-RAS (2011), US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center River Analysis System.

Hedrick, P. W. and P. S. Miller (1992), "Conservation genetics: techniques and fundamentals", *Ecological Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 30-46.

Hengl, T. (2006), "Finding the right pixel size", *Computers and Geosciences*, no. 32, pp. 1283-1298.

Heopffner, N. (2008), "Biogeochemical cycles", *Why Ocean Colour? The Societal Benefits of Ocean-Colour Technology*, IOCCG.

Hernández, A. (2003), *Corrección geométrica de imágenes aéreas digitales*, tesis de Licenciatura (Ingeniería en Computación), Facultad de Ingeniería, UNAM, México, pp. 1-94.

Hernández Gil, R. (2002), [http:forest.ula.ve/˜rebenhg; 8 de julio].

Herrera Silvera, J. A. (1994), "Correlaciones de parámetros hidrobiológicos de la Laguna de Celestúm, Yucatán", *Anuario del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, UNAM, México, vol. 21, no. 1-2, pp. 43-53.

Herron, R. C., T. D. Leming and J. Li (1989), "Satellite detected fronts and butterfish aggregations in the northeastern Gulf of Mexico", *Continental Shelf Research*, vol. 9, no. 6, pp. 569-588.

Hoepffner, N. *et al*. (2008), "Biogeochemical cycles", *Why Ocean Colour?*, The Societal Benefits of Ocean-Colour technology, IOCCG.

Howard, J. A. (1991), *Remote sensing of forest resources*. Theory and application, Chapman & Hall, London.

Howell, S. N. G. and S. Webb (1995), *A guide to the birds of Mexico and Northern Central America*, Oxford University Press.

Hui-Sheng, H. and F. Li-Min (2010), "Gyro-stabilized platform design for airborne pod based on Elmo digital servo controller", *Electronic Design Engineering*, 2010-10.

Hurst, H. E. (1951), "Long-term storage capacity of reservoirs", *Transactions of the American Society of Civil Engineering*, no. 116, pp. 770-799.

Hutchinson, J. N. (1988), "General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrology", in Bornnard, C. (ed.), *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherland, no. 1, pp. 3-35.

Ibarra Manríquez, G. y S. Sinaca (1987), *Listados florísticos de México VII. Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas, Veracruz*, Instituto de Biología, UNAM, México.

INE (1993), "Sierra de Santa Marta", encuesta en Gómez Pompa, A. y R. Dirzo *et al*. (comps.), *Proyecto de evaluación de áreas naturales protegidas de México*, SEDESOL. México.

INEGI (1994), Ortofotos Claves E14a25C, E14a26B, E14a26A, E14a25F, E14a26E, E14a26D, E14a35F, E14a35C, E14a36E, E14a36B, E14a36D, E14a36A, F14a86E, E14a16B, F14a86F y E14a16C. México D.F.

INEGI (2000), *Guasave, estado de Sinaloa, Cuaderno estadístico municipal*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

INEGI (2006), *Curvas digitales de la carta topográfica Chalco E14-B31*, esc. 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

INEGI (2012a), *Ortofoto Digital* [http://mapserver.inegi.org.mx/prodgeog/cargaTema.do?tema=4].

INEGI (2012b), *Compendio de criterios y especificaciones técnicas para la generación de datos e información de carácter fundamental* [http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/15-%20imagenes_digitales_ortorectificadas_fotogrametricamente.pdf (con acceso en enero de 2012)].

INEGI (2012c), *Continuo de elevaciones Mexicano CEM (2.0)* [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx].

Ineter/COSUDE (2003–2005), *Recomendaciones técnicas el estudio de la inestabilidad de laderas*, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Managua.

Jäger, S. and G. F. Wieczorek (1994), *Landslide susceptibility in the Tully Valley Area, Finger Lakes Region, New York*, US Geological Survey Open-File Report 94–615, pp. 1-13 [/http://pubs.usgs.gov/of/1994/ofr-94-0615/tvstudy.htmS].

Jensen, J. R. (2004), *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*, 3rd ed., Prentice Hall Series, New Jersey.

Jensen, J. R. (2007), *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*, 2nd Ed., Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.

Jiang, X. and D. Qi (2009), "The research of gyro-stabilized platform & POS application technology in airborne remote sensing", *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Material and Device Technology for Sensors*, Proceedings of the SPIE, volume 7381, pp. 73812A-73812A-8.

Johnson, S. C. (1967), "Hierarchical Clustering Schemes", *Psychometrika*, no. 32, pp. 241-254.

Johnson, D. R. (1981), *The study of raptor populations*, University Press of Idaho, Moscow, Idaho.

Key, T., T. A. Warner, J. B. McGraw and M. A. Fajvan (2001), "A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate Hardwood forest", *Remote Sens. Environ.*, vol. 75, pp. 100-112.

Kidwell, K. (1991), *NOAA polar orbiter data user's guide*, NOAA/NESDIS/NCDC/SDSD, Washington, D. C.

King, D. J. (1992), "Development and application of an airborne multispectral digital frame camera sensor", *Proc. XVII Congress of the ISPRS Commission I*, Washington D.C. August 2-14, pp. 190-192.

Kleinbaum, D. G. and M. Klein (2002), *Logistic regression: a self-learning Text* (Second edition), Springer, New York.

Korup, O. (2005), "Geomorphic imprint of landslides on alpine river systems, southwest New Zealand", *Earht surface processes and landforms*, no. 30, pp. 783-800.

Kratzer, S., D. Bowers and P.B. Tett (2000), "Seasonal changes in colour ratios and optically active constituents in the optical case-2 waters of Menai Strait, North Wales", *Int. J. Remote Sensing,* vol. 21, no. 11, pp. 2225-2246.

Laliberte, A. S. and A. Rango (2009), "Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* Special Issue on UAV Sensing Systems in Earth Observation vol. 47, no. 3, pp. 761-770.

Lan, H. X., C. H. Zhou, L. J. Wang, H. Y. Zhang and R. H. Li (2004), "Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China", *Engineering Geology*, no. 76, pp. 109-128.

Lang, A., J. Moya, J. Corominas, L. Schrott and R. Dikau (1999), "Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements", *Geomorphology*, no. 30, pp. 33-52.

Lanly, J. P. (1989), "Forest resources of the world", *Proceedings Wildland Conference*, 23-26, Boston, MA, USA, USDA Forest Service, pp. 10-13.

Lee, C. Y. (1992), "Factors affecting the phytoplankton assemblages in tropical coastal waters influenced by thermal effluent of a power plant", *Bulletin of Plankton Society of Japan*, vol. 39, no. 1, pp. 25-39.

Lee, J. and D. W. S. Wong (2001), *Statistical Analysis with ArcView GIS*, John Wiley & Sons, USA.

Lee, S., J. H. Ryu, J. S. Won and H. J. Park (2004), "Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network", *Engineering Geology*, no. 71, 289-302.

Legorreta Paulín, G. (1999), *Procesos geomorfológicos en el volcán Parícutin*, tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras. Colegio de Geografía, UNAM, México.

Legorreta Paulín, G. and M. Bursik (2006), "LOGISNET: a tool for multimethod, multilayer slope stability analysis", *Proceedings of the 3rd biennial meeting of the International Environmental Modeling and Software Society*, Burlington, Vermont [http://www.iemss.org/iemss2006/sessions/all.html#S11].

Legorreta Paulín, G. and M. Bursik (2008), "Logisnet: a tool for multimethod, multiple soil layers slope stability analysis", *Computers and Geosciences*.

Libes, S. M. (1992), *An introdcution to marine biogeochemistry*, Wiley, New York.

López García, J. (2006), *Análisis de Cambio de la Cobertura Forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (2005-2006)*, Reporte al Fondo Monarca, México.

López García, J. (2007), *Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (2006-2007)*, Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN), agosto, México.

López García, J. (2009), "Análisis de cambio en la cobertura forestal en la zona núcleo de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca: 2003-2006", en Aguirre Gómez, R. (coord.), *Conceptos y aplicaciones de la Geomática en México*, Geografía para el siglo XXI, Serie Libros de Investigación, núm. 5, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 195-210.

López García, J. and V. Caselles (1991), "Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper Data", *Geogarto International*, no. 1, pp. 31-37.

López, F. (2006), *Formación de mosaicos ortorectificados utilizando imágenes aéreas digitales*, tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Lugo Hubp, J. (1989), *Diccionario geomorfológico*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Luna Bauza, C. (1994), *Crónica de los huracanes en el estado de Veracruz*, Colección Testimonios No. 6, Editora del Gobierno del Estado de Veracruz-Llave, Xalapa.

Madej, M. A., C. O´Sullivan and N. Varnum (1986), *An evaluation of land use, hydrology, and sediment yield in the Mill Creek watershed, Northern California*, Redwood National park Research and Development Technical Report 17, Arcata, California.

Mandelbrot, B. (1983), *The fractal geometry of nature*, Freeman, San Francisco.

Mandelbrot, B. (2002), *Gaussian Self-Affinity and Fractals*, Springer, New-York.

McClain, E. P., W. G. Pichel and C. C. Walton (1985), "Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature", *Journal of Geophysical Research*, no. 90, pp. 11587-11601.

McGrew, J. Ch. Chapman and B. Monroe (2009), *An introduction to statistical problem solving in Geography,* 2nd ed., Waveland Press.

Marlon, R. L., E. Roderick and P. Trevor (1985), "Absorption and photosynthetic action spectra for natural phytoplankton population: implications for production in the open ocean", *Limnol. Oceanogr.*, American Society of Limnology and Oceanography, Inc., vol. 30, no. 4, pp. 794-806.

Martín, M. P., I. Gómez and E. Chuvieco (2005), "Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data", in Riva, J., F. Pérez Cabello and E. Chuvieco (eds.), *Proccedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: fire Effects Assessment*, Universidad de Zaragoza, Gofc-Gold, EARSeL, Paris, pp. 193-198.

Martínez López, A., D. C. Escobedo Urías, A. E. Ulloa Pérez and R. Aguirre Gómez (2008), "Dynamics of a *Prorocentrum minimum* bloom along the northern coast of Sinaloa, Mexico", *Continental Shelf Research*, no. 28, pp. 1693-1701.

Mas, J. F., A. Velásquez, J. L. Palacio Prieto, G. Bocco, A. Peralta Higuera and J. Prado (2002), *Assessing Forest Resources in Mexico: Wall-to-Wall Land Use/Cover Mapping*, PE&RS, October, pp. 966-968.

Matheron, G. (1967), *Eléments pour une théorie des milieux poreux*, Masson, Paris.

Matheron, G. (1975), *Sets and Integral Geometry*, Wiley, New York.

Mee, L. D., M. Espinosa and G. Díaz (1986), "Paralytic shellfish poisoning with a Gymnodinium catenatum red tide on the Pacific coast of Mexico", *Marine Environmental Research*, no. 19, pp. 77-92.

Meisina, C. and S. Scarabelli (2007), "A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils", *Geomorphology*, no. 87, pp. 207-223.

Menard, S. (2002), *Applied logistic regression analysis*, second ed., Sage Publications, Thousand Oaks, CA.

Metternicht, G., L. Hurni and R. Gogu (2005), "Remote sensing of landslides: an analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments", *Remote Sensing of Environment*, no. 98, pp. 284-303.

Miles, S. B. and C. L. Ho (1999), "Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. 18, pp. 305-323.

Mills, J. P., I. Newton and R. W. Graham (1996), "Aerial photography for survey purposes with a high resolution, small format, digital camera", *Photogrammetric Record*, October, vol. 15, no. 88, pp. 575-587.

Miranda Martínez, M. E., K. Oleschko, J.-F. Parrot, F. Castrejón Vacio, H. Taud y F. Brambila Paz (2006), "Porosidad de los yacimientos naturalmente fracturados: una clasificación fractal", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas,* vol. 23, núm. 2, pp. 199-214.

Montgomery, D. R. and W. E. Dietrich (1994), "A physical based model for the topographic control on shallow landslides", *Water Resources Research*, no. 30, pp. 1153-1171.

Morgan, M. (2004), *Epipolar resampling of linear array scanners scenes*, Ph.D Thesis, University of Calgary.

Morrissey, M. M., G. F. Wieczorek and B. A. Morgan (2001), *A comparative analysis of hazard models for predicting debris flows in Madison County*, *Virginia*, US Geological Survey Open-File Report 01-0067 [/http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0067/ofr-01-0067.htmlS].

Mooser, F. (1972), "The Mexican volcanic belt: structure and tectonics", *Geofis. Int.*, no. 12, pp. 55-70.

Muñoz, P., S. Avaria y M. Farías (1991), "Uso de información satélite en el estudio de un nuevo fenómeno de marea roja en la Bahía de Valparaíso, Chile", *Revista de Biología Marina*, Valparaíso, vol. 26, núm. 2, pp. 415-435.

NASA (2011), *Earth Observatory* [http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php (con acceso en enero de 2011)].

Navarro Olache, L. F., M. F. Lavín and A. Z. Álvarez Sánchez (2004), "Internal structure of SST features in the central Gulf of California", *Deep-Sea Research Part II*, Elsevier, pp. 673-687.

Neumann, K. J. (2005), *Digital Aerial Cameras*. Intergraph Z/I Deutschland GMBH, pp. 1-5 [http://icaci.org/documents/ICC_proceedings/ICC2009/html/nonref/1_6.pdf (acceso: enero de 2012)].

Newton, I. (2000), *Birds of Prey*, Weldon Owen Inc., reprint edition.

Ochoa Tejeda, V. (2004), *Propuesta metodológica para el estudio de la inestabilidad de laderas a partir de los MDE y la Percepción Remota. Sierra Norte de Puebla: México*, tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Ochoa Tejeda, V. (2009), *Control estructural de la inestabilidad de laderas: modelación tridimensional de los rasgos geológicos. Aplicación al estudio de los procesos de remoción en masa de La Soledad, Sierra Norte de Puebla, México*, tesis de Doctorado, UNAM, México.

Ochoa Tejeda, V. (2010), *Etude des facteurs favorables au déclenchement des glissements de terrain dans les formations superficielles et les affleurements rocheux de la Sierra Norte de Puebla (Mexique)*, Université Paris 7 Denis Diderot, Paris France.

Ohlmacher, G. C. and J. C. Davis (2003), "Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA", *Engineering Geology*, no. 69, pp. 331-343.

Olendorff, R. R. (1993), *Biology and management of ferruginous hawk (Buteo regalis): a review*, Occasional Papers Number 1, Raptor Research and Technical Assistance Center, U.S. Bureau of Land Management, Boise, Idaho, USA.

Oleschko K., R. P. Brambila, F. P. Brambila, J.-F. Parrot and P. G. López (2000), "Fractal ana-lysis of Teotihuacan, Mexico", *J. Archaeological Science*, vol. 27, no. 11, pp. 1007-1016.

Oleschko, K., J.-F. Parrot, G. Ronquillo, S. Soba, G. Stoops and V. Marcelino (2004), "Weathering: toward a fractal quantifying", *Mathematical Geology*, vol. 36, no. 5, pp. 607-627.

Oleschko, K., G. Korvin, A. Muñoz, J. Velásquez, M. E. Miranda, D. Carreon, L. Flores, M. Martínez, M. Velásquez Valle, F. Brambilla, J.-F. Parrot and G. Ronquillo (2008), "Fractal mapping of soil moisture content from remote sensed multi-scale data", *Nonlinear Processes in Geophysics Journal (special issue on nonlinear and scaling processes in hydrology and soil science)*, no. 15, pp. 711-725.

O'Loughlin, E. M. (1986), "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis", *Water Resources Research*, no. 22, pp. 794-804.

Opazo Saldivia, S. y E. Chuvieco Salinero (2007), "Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas", *Revista de Teledetección*, núm. 27, pp. 27-43.

Ortega Guerrero, M. A., D. Rudolph and J. A. Cherry (1999), "Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: investigations and predictive modeling", *Water Resources Research*, vol. 35, no. 11, pp. 3327-3341.

Ortiz Zamora, D. C. and M. A. Ortega Guerrero (2010), "Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: review, field investigations and predictive simulations", *Water Resources Research*, no. 46, W01513.

Osman-Akan, A. and R. Houghtalen (2003), *Urban Hydrology, hydraulics and stormwater quality: engineering applications and computer modeling*, John Wiley and Sons.

OziPhoto Tool (2012) [http://www.oziphototool.com (con acceso en enero de 2012)].

Pack, R. T., D. G. Tarboton and C. N. Goodwin (2001), "Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP", *Proceedings of the 15th Annual GIS Conference*, Vancouver, British Columbia [http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/].

Pack, R. T., D. G. Tarboton and C. N. Goodwin (1998), "The SINMAP approach to terrain stability mapping", *Proceedings of the Eighth Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver, British Columbia, Canada [http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/].

Pack, R. T., D. G. Tarboton and C. N. Goodwin (1997), SINMAP- A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping – Users Manual [http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/].

Palacio Prieto, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J.-F. Mas *et al.* (2000), "La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000", *Investigaciones Geográficas*, *Boletín*, núm. 43, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 183-202.

Pallant, J. (2005), *SPSS survival manual: a step by step guide to data analysis using SPSS for Windows (Version 12)*, Open University press, Buckingham.

Palma Muñoz, M. F. (1997), *Delimitación de unidades ambientales en el sur del valle de México, con ayuda de sistemas de información geográfica y percepción remota*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.

Pare, L., E. Ortilla, F. Ramirez, E. Rodríguez Luna, H. Narvae y S. Guevara (1992), *Los Tuxtlas: plan para su conservación y desarrollo integral*, Gobierno del Estado de Veracruz y Universidad Veracruzana, Xalapa.

Parise, M. (2001), "Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard", *Physics and Chemistry of the Earth*, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science, no. 26, pp. 697-703.

Parker, J. R. (1994), *Practical computer vision using C*, Wiley & Sons, New-York.

Parker, D. C., T. Berger and S. M. Manson (2001), "Agent-based models of land-use and land cover", *Report and Review of an International Workshop*, October 4-7, Irvine, California, USA. LUCC Report Series no. 6,

Parker, D. C., S. M. Manson, M. A. Janssen, M. J. Hoffman and P. Deadman (2002), "Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review", *Forthcoming, Annals of the Association of American Geographers.*

Parrot, J.-F. (1992), Brod_tab.exe : Transformation des courbes de niveaux 8 bits en courbes altimétriques. LGGST ORSTOM, doc. interne, 4 p. multigr.

Parrot J.-F. (2003), Versión española y adaptación de los algoritmos Brod_tab.exe y Newmiel.exe (inédito) Brod4_mx.exe y Miel4_mx.exe.

Parrot, J.-F. (2004a), Superpos.exe (Instituto de Geografía, programa interno).

Parrot, J.-F. (2004b), "*New-Miel"*, en Parrot, J.-F. y V. Ochoa Tejeda (2004), *Generación de Modelos Digitales de Terreno raster. Método de Digitalización*, Geografía para el Siglo XXI, serie libros digitales, núm. 1, Instituto de Geografía, UNAM (en línea).

Parrot, J.-F. (2005), Multidim_class.exe (Instituto de Geografía, programa interno).

Parrot, J.-F. (2006), Software TLALOC (Tridimensional Landscape Análisis. Local Operating Computation), Versión 01, número de certificado UNAM: 03-2006-09211451400-01.

Parrot, J.-F. (2007), "Tri-dimensional parametrisation: an automated treatment to study the evolution of volcanic cones", *Geomorphologie*, no. 3, pp. 247-258.

Parrot, J.-F. (2009a), BVS. (Instituto de Geografía, programa interno).

Parrot, J.-F. (2009b), Software FROG_V1, UNAM (número de certificado INDA (Instituto Nacional de Derecho de Autor): 03-2010-012812384700-01

Parrot, J.-F. (2009c), "DEM simulation of petroleum flux extension and diffusion due to pipeline ruptures in Mexico", in Anderssen, R. S., R. D. Braddock and L.T.H. Newham (eds.), *18th World* IMACS *Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation*, July, pp. 2701-2705.

Parrot, J.-F. (2010), *Charcos* (software inédito).

Parrot, J.-F. (2012), Software FROG_V2, UNAM (depositado, Instituto Nacional de Derecho de Autor): en dictamen.

Parrot, J.-F. et H. Taud (1993). Newmiel.exe: Interpolation multidirectionelle. LGGST ORSTOM, doc. interne, 7 p. multigr.

Parrot, J.-F. and B. Collet (2009), "Simulation of lithospheric plate collision by using DEM. Example of the Arabian platform motion", in Anderssen, R. S., R. D. Braddock and L.T.H. Newham (eds.), *18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation*, July, pp. 1052-1058.

Parrot, J.-F., N. Lyberis, B. Lefoconnier and Y. G. Manb (1993), "SPOT multiespectral data and digital terrain model for the analysis of ice-snow fields on Arctic glaciers", IJRS, vol. 14, no. 3, pp. 425-440.

Parrot, J.-F. y V. Ochoa Tejeda (2005), *Generación de Modelos Digitales de Terreno raster. Método de digitalización*, Geografía para el siglo XXI, Serie Textos universitarios, Instituto de Geografía, UNAM.

Parrot, J.-F. and V. Ochoa Tejeda (2008), "Active landslide traces in mountainous areas extracted by using high resolution satellite images and high resolution DEM", *IAG Regional Conference on Geomorphology*, Brasov, Romania, September 15-26.

Pasuto, A. and M. Soldati (1999), "The use of landslide units in geomorphological mapping: an example in the Italian Dolomites", *Geomorphology*, no. 30, pp. 53-64.

Peláez, J. (1987), "Satellite images of a red tide episode off Southern California", *Oceanologica Acta,* vol. 10, no. 4, pp. 403-410.

Pennington, T. D. y J. Sarukhán (2005), (3rd. ed.), *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies*, UNAM/FCE, México.

Pentland, A. (1984), "Fractal based description of natural scenes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Intelligence, Pami-6*, no. 6, pp. 661-674.

Peralta Fabi, R., A. Peralta Higuera, J. Prado, E Vicente y M. Navarrete (1991), "CCD image acquisition for multispectral teledetection", *SPIE Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*, San José, California, USA, February 9-14, SPIE proceedings, vol. 1656, pp. 350-358.

Peralta Higuera, A., J. López, E. Rendón Salinas, J. Honey, D. Newman, J. Carranza, J. Prado Molina and L. P. Brower (2003), *Airborne digital photography as a tool for the management of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve*, ASPRS 19th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and Airborne Imaging for Resource Assessment, Logan, Utah, October 6-8.

Peralta Higuera, A., J. Prado Molina, E. Cabral Cano and O. Díaz Molina (2005), "A comparison of small-format digital vs. metric aerial cameras for medium to large-scale mapping", *20th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Weslaco, Texas, October 4-6, pp. 1-6 [CD].

Peralta Higuera, A. *et al*. (2001a), "Aerial digital photography as a tool for watershed management in Central Mexico", *18th Biennial Workshop on Color Photography & Videography in Resource Assessment,* American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Amherst, Massachusetts, May 16-18, Work No. 19, pp. 1-6.

Peralta Higuera, A. *et al.* (2001b), "Nationwide sampling of Mexico with airborne digital cameras: an image database to validate the interpretation of satellite data", *18th Biennial Workshop on Color Photography & Videography in Resource Assessment*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Amherst, Massachusetts, May 16-18, Work No. 20, pp. 1-8.

Peralta Higuera, A. *et al.* (2001c), "The use of digital aerial photographs in the study of the overwintering areas of the Monarch Butterfly in Mexico", *18th Biennial Workshop on Color Photography & Videography in Resource Assessment*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Amherst, Massachusetts, May 16-18, Work No. 21, pp 1-9.

Peralta Higuera, A. *et al.* (2005), "Quantification of irregular settlements over conservation land in Southern Mexico City", *20th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Weslaco, Texas, October 4-6 [CD], Work No.63, pp.1-8.

Peralta Higuera, A., H. Alafita and J. Prado Molina (2007, "Measuring shoreline change and mangrove damage after hurricane Wilma in the Mayan Riviera using color and near-infrared digital cameras", *21st Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment*, American

Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Terre Haute, Indiana, May 15-17.

Pereira, J. M. C., A. C. L. Sá, A. M. O. Sousa and J. M. N. Silva (1999), "Spectral characterization and discrimination of burnt areas", in Chuvieco, E. (ed.), *Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean Basin*, Springer, pp. 123-138.

Pérez Higareda, G., R. C. Vogt y O. Flores Villela (1987), *Lista anotada de los anfibios y reptiles de la región de Los Tuxtlas, Veracruz*, Instituto de Biología, UNAM, México.

Peterson, R. T. y E. L. Chalif (1998), *Aves de México. Guía de campo: identificación de todas las especies encontradas en México, Guatemala, Belice y El Salvador*, 3ª. reimp., Diana, México.

Philip, G., D. Donoghue, A. Beck and N. Galiatsatos. (2002), "CORONA satellite photography: an archaeological application from the Middle East", *Antiquity*, no. 76, pp. 109-18.

PhotoShop CS5 (2012), *Adobe PhotoShop CS5* [http://www.adobe.com/products/creativesuite.html (con acceso en enero de 2012)].

Pouliot, D. A. and D. J. King (2005), "Approaches for optimal automated tree crown detection in young regenerating coniferous forest", *Canadian Journal of Remote Sensing*, no. 31, pp. 256-267.

Prado Molina, J., G. Bisiacchi, J. L. Palacio Prieto, A. Peralta Higuera, J. M. Becerril, M. Rodríguez, R. Bermúdez y U. Martínez (2000a), "Sistema de adquisición de imágenes aéreas digitales de alta resolución", *SOMI XV Congreso Nacional de Instrumentación,* Guadalajara, Jalisco, México, octubre 16-20, pp. 1-6 [CD].

Prado Molina, J., G. Bisiacchi, J. M. Becerril y M. Rodríguez (2000b), "Implementación de un sistema de navegación inercial para orientación y control de una plataforma aérea", *SOMI XV Congreso Nacional de Instrumentación*, Guadalajara, Jalisco, México, octubre 16-20, pp. 1-8 [CD].

Prado Molina, J., A. Hernández and A. Peralta Higuera (2003), "Small-format camera calibration and geometric distortion removal in digital aerial images", *Proceedings of the ASPRS 19th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and Airborne Imaging for Resource Assessment*, October 6-8, Logan, Utah (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland), [CD-ROM].

Prado Molina, J. y A. Peralta Higuera (2005), "Diagnosis and delimitation of a natural protected area using high-resolution multispectral images", *20th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Weslaco, Texas, October 4-6, pp. 1-8 [CD].

Prado Molina, J., A. Peralta Higuera, J. L. Palacio Prieto and R. Sandoval (2006), "Airborne high-resolution digital imaging system", *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 3-23.

Prado Molina, J., A. Peralta Higuera, G. Galindo and L. A. Olvera (2007), "The use of color and near-infrared images acquired with small-format digital cameras in the identification of sites affected by pests over a large area in San Luis Potosí, Mexico", *21st Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Terre Haute, Indiana, May 15-17.

Prado Molina, J., J. A. Quintero Pérez, A. R. Rosales, A. Peralta Higuera, M. A. Ramírez y M. Zamora (2012), "Elaboración de cartas aeronáuticas OACI: planos de obstáculos de aeródromo, a partir de imágenes aéreas digitales de alta resolución", *Investigaciones Geográficas*, *Boletín*, núm. 79, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 75-96.

Prado Molina, J., A. Peralta Higuera, J. L. Palacio Prieto and R. Sandoval (2006), "Airborne high-resolution digital imaging system", *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 3-23.

Prado Molina, J., A. Peralta Higuera, G. Galindo and L. A. Olvera (2007), "The use of color and near-infrared images acquired with small-format digital cameras in the identification of sites affected by pests over a large area in San Luis Potosí, Mexico", *21st Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Terre Haute, Indiana, May 15-17.

Prado Molina, J., A. Peralta Higuera y J. López García (2008), "Utilización de imágenes aéreas digitales de pequeño formato para la evaluación de desastres", *XIII Simposio de la Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial*, La Habana, Cuba, septiembre 22-26, pp. 1-8.

Pratt, W. K. (1978), *Digital image processing*, Wiley, New-York.

Preston, C. R. and R. B. Beane (1993), *Diurnal raptor species occurence and distribution in relation to human activity and other factors at Rocky Mountain Arsenal, Colorado*, Department of Zoology, Denver Museum of Natural History.

PTlens (2012) [http://epaperpress.com/ptlens/].

Qin, S., J. J. Jiao and S. Wang (2002a), "A nonlinear dynamical model of landslide evolution", *Geomorphology*, no. 43, pp. 77-85.

Qin, S., J. J. Jiao, S. Wang and H. Long (2002b), "A nonlinear catastrophe model of instability of planar-slip slope and chaotic dynamical mechanisms of its evolutionary process", *International Journal of Solids and Structures*, no. 38, pp. 8093-8109.

Ralls, K. and J. D. Ballou (eds.; 1986), "Proceedings of the workshop on genetic management of captive populations", *Zoo Biology*, vol. 5, no. 2.

Ramírez, M. A. (2011), *Adquisición de imágenes aéreas digitales su procesamiento, aprovechamiento a través de fotografía digital y herramientas SIG*, Informe académico por actividad profesional, Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, pp. 1-65.

Ramos, M. A. (1985), "Endangered tropical birds in Mexico and northern Central America", in Diamond, A. W. and T. E. Lovejoy (eds.), *Conservation of tropical forest birds*, ICBP Technical Publication No. 4, pp. 305-318.

Richard, J. F. et N. L. Beroutchachvili (1996), "Vers l'élaboration d'un système d'information sur les paysages du monde" / "Towards the development of an information system on the landscapes of the world", Cahiers des Sciences Humaines de l'Orstom, Paris, vol. 32, no. 4, pp. 823-842.

Richards, J. A. and X. Jia (2005), *Remote sensing digital image analysis*, Springer Verlag, Berlín (4th edition).

Richards, J. and X. Jia (2006), *Remote sensing digital image analysis*, 4th edition, Springer.

Riley J. P. y R. Chester (1989), *Introducción a la Química Marina"*, AGT Editor.

Robinson, I. S. (1985), *Satellite Oceanography. An introduction for oceanographers and remote sensing scientists*, Ellis Horwood Press, John Wiley, p. 455.

Robinson, J. M. (1991), "Fire from space: global fire evalution using infrared remote sensing", *International Journal of Remote Sensing*, no. 12, pp. 3-24.

Roy, D., P. E. Lewis and C. O. Justice (2002), "Burned area mapping using multitemporal moderate spatial resolution date-a bi-directional reflectance model-based expectation approach", *Remote Sensing of Environment*, no. 83, pp. 263-286.

Ruiz Luna, A. y G. de la Lanza Espino (1999), *Sistemas rurales de producción camaronícola en Guasave, Sinaloa y norte de Nayarit (descripción física, entorno y ubicación)*, CIAD-IBUNAM.

Salmerón García O. (2009), "La producción pesquera en el Golfo de México y su relación con los procesos oceanográficos a partir de datos satelitales", en Aguirre Gómez, R. (coord.), *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*, Geografía para el siglo XXI (Serie Libros de Investigación, núm. 5), Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 315-330.

Salmerón Garcia, O. (2010), "Regionalization of the Gulf of Mexico from space-time chlorophyll-a concentration variability", *Ocean Dynamics*.

Santamaría del Ángel, E., S. Álvarez Borrego and F. E. Müeller Karger (1994), "The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in the coastal zone color scanner imagery", *Journal of Geophysical Research*, no. 99, pp. 7423-7431.

Savanah Simulations (2010), Flood Area software.

SeaSpace (1999), *Terascan Reference Manual*.

SeaSpace Corporation (2009), *SeaSpae* [http://www.seaspace.com/technical/html/man7/nitpix.html].

Selby, M. J. (1993), *Hillslope materials and process*, Oxford University Press, Oxford.

Schonewald Cox, C. M., S. M. Chambers, B. MacBryde and L. Thomas (eds.; 2004), *Genetics and conservation*, The Blackburn Press.

Schmeiser, B. W. (1990), "Simulation methods", in Heyman, D. P. and M. J. Sobel (eds.), *Stochastic Models*, North Holland.

Serra, J. (1982), *Image Analysis and Mathematical Morphology* (vol. 1), Academic Press, London.

Serra, J. (1988), *Image Analysis and Mathematical Morphology* (vol. 2): Theoretical Advances, Academic Press, London.

Sevanez, H. N., L. Forman and G. Alves (1988), "Comparative chromosome morphology in three callitrichid genera: *Cebuella, Callithrix* and *Leontopithecus", Journal of Heredity*, no. 79, pp. 131-134.

Sugumaran, R., M. K. Pavuluri and D. Zerr (2003), "The use of high-resolution imagery for identification of urban climax forest species using traditional and rule-based classification approach", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol 41, no. 9, pp. 1933-1939.

Simon, A., A. Curini, S. E. Darby and E. J. Langendoen (2000), "Bank and near-bank processes in an incised channel", *Geomorphology*, no. 35, pp. 193-217.

Simon, A. and A. J. C. Collison (2002), "Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability", *Earth Surface Processes and Landforms Earth Surf*, Process, Landforms, no. 27, pp. 527-546.

Smith, R. N., S. H. Anderson, S. L. Cain and J. R. Dunk (2003), "Habitat and nest-site use by red-tailed hawks in Northwestern Wyoming", *The Journal of Raptor Research*, vol. 37, no. 3, pp. 219-227.

SMN (2010), *Precipitación pluvial diaria de la estación climatológica Chalco, 1961-2008*, Servicio Meteorológico Nacional, México.

Soulé, M. E. (ed.; 1986), *Conservation biology: the science of scarcity and diversity*, Sinauer, Sunderland, Massachussetts, USA.

Soulé, M. E. (ed.; 1987), *Viable populations*, Cambridge University Press, Cambridge, England.

Soulé, M. E. and K. A. Kohm (eds.; 1989), *Research priorities for conservation biology*, Island Press, Washington, D.C.

Stangel, P. W., M. R. Lennartz and M. H. Smith (1992), "Genetic variation and population structure of red-cockadaed woodpeckers", *Conservation Biology*, vol. 6, no. 2.

Stotz, D. F., J. W. Fitzpatrick, T. A. Parker III and D. K. Moskovits (1996), *Neotropical Birds: Ecology and Conservation*, The University of Chicago Press, Chicago and London.

Strickland, J. D. and T. R. Parsons (1972), "A practical handbook of seawater analysis", *Fisheries Research Bulletin of Canada*, 2nd edition.

Taud, H., J.-F. Parrot and R. Álvarez (1999), "DTM generation by contour line dilation", *Computer and Geosciences*, no. 25, pp. 775-783.

Terborgh, J. and B. Winter (1980), "Some causes of extinction", in Soule, M. E. and B. A. Wilcox (eds.), *Conservation Biology: an evolutionary-ecological perspective*, Sinauer, Sunderland, Massachusett, pp. 119-134.

Tobutt, D. C. (1982), "Monte Carlo simulation methods for slope stability", *Computers and Geosciences*, no. 8, pp. 199-208.

Tomlison, M. C., R. D. Stumpf, V. Ransibrahmanakul, E. W. Turby, G. J. Kirkpatrick and B. A. Pederson (2004), "Evaluation of the use of SeaWifs imagery for detecting Karenia Brevis harmful algal blooms in the eastern Gulf of Mexico", *Remote Sensing of Environment*, no. 3-4, vol. 91, Elsevier, pp. 293-303.

Torres Argüelles, V., K. Oleschko, A. M. Tarquis, G. Korvin, C. Gaona, J.-F. Parrot and E. Ventura Ramos (2010), "Fractal metrology for biogeosystems analysis", *Biogeosciences Discussions*, no. 7, pp. 4749-4799.

Universidad de las Palmas de Gran Canaria (2003), Biblioteca digital [htpp—bdigital.ulpgc.es-digital-texto-pdf-210471_0004.pdf (18 de diciembre de 2009)].

Valiela, I. (1995), *Marine Ecological Processes*, Second Edition, Springer, New York, pp. 55-75.

Van Den Eeckhaunt, M., J. Poesen, G. Verstraeten, V. Vanacker, J. Moeyersons, J. Nyssen and L. P. H. Van Beek (2005), "The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deep-seated landslides", *Geomorphology*, no. 67, pp. 351-363.

Van Den Eeckhaunt, M., A. Marre and J. Poesen (2010), "Comparison of two landslide susceptibility assessments in the Champagne–Ardenne region (France)", *Geomorphology*, no. 115, pp. 141-155.

Vásquez Méndez, R., E. Ventura Ramos, K. Oleschko, L. Hernadez Sandoval, J.-F. Parrot, and M. A. Nearing (2010), "Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico", *Catena*, no. 80, pp. 162-169.

Verma, S. (1983), "Magma genesis and chamber processes at Los Humeros caldera, Mexico—Nd and Sr isotope data", *Nature*, no. 302, pp. 52-55.

Visual Basic (2010), Microsoft software.

Waugh, J. D. and R. Pérez Gil (1992), "North America Regional Review", *IV World Congress on National Parks and Protected Areas*, Caracas, Venezuela, 10-21.

Wawer, R. and E. Nowocień (2003), "Application of SINMAP terrain stability model in Grodarz stream watershed", *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*.

Wilcox, B. A. (1980), "Insular ecology and conservation", in Soulé, M. E. and B. A. Wilcox (eds.), *Conservation Biology*, Sinauer Associates, Sunderland, Massachusett.

Wilcox, B. A., M. Buchner and P. R. Ehrlich (1988), *Tropical deforestation and species extinction: an assessment of the status of our knowledge and scientific needs*, Review document prepared for the World Wildlife Fund. Washington, D.C.

Wills, C. J. (2000), *Landslides in the highway 101 corridor between Wilson Creek and Crescent city, Del Norte County, California*, California Department of Conservation, California Geological Survey, Sacramento, CA.

Wilson, E. O. (ed.; 1988), *Biodiversity*, National Academy Press, Washington, D.C.

Winker, K., R. J. Oehlenschlager, M. A. Ramos, R. M. Zink, J. H. Rappole and D. W. Warner (1992), "Avian distribution and abundance records for the Sierra de los Tuxtlas, Veracruz, Mexico", *Wilson Bull.*, vol. 104, no. 4, pp. 699-718.

Winsemius, H. C., H. H. G. Savenije, A. M. J. Gerrits, E. A. Zapreeva and R. Klees (2005), "Comparison of two model approaches in the Zambezi river basin with regard to model reliability and identifiability", *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2, pp. 2625-2661.

Witt, A. C. (2004), "Using a Geographic Information System (GIS) to model slope instability and debris flow hazards in the French Broad River Watershed, North Carolina", *Proceedings of Northeastern Section (39th Annual) and Southeastern Section (53rd Annual)*, Joint Meeting [http://gsa.confex.com/gsa/2004NE/finalprogram/abstract_69868.htm].

Wolf, P. R. and B. A. Dewitt (2000), *Elements of photogrammetry with applications in GIS*, Mc Graw Hill, pp. 1-608.

Wulder, M. A., R. J. Hall, N. C. Coops and S. E. Franklin (2004), "High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization", *Bio Science*, vol. 54, no. 6, pp. 511–521.

Wulder, M. (1998), "Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters", *Progress in Physical Geography*, vol. 22, no. 4, pp. 449-476.

WWF (2009), *Deforestación y degradación en la zona núcleo de la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca 2008-2009*, resumen ejecutivo [http://www.wwf.org.mx/wwfmex/descargas/res_degradacion_deforestacion_monarca_2008-2009.pdf (con acceso en enero de 2012)].

Yesilnacar, E. and T. Topal (2005), "Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey)", *Engineering Geology*, no. 79, pp. 251-266.

Zaitchik, B. F., H. M. Van Es and P. J. Sullivan (2003), "Modeling slope stability in Honduras: parameter sensitivity and scale of aggregation", *Soil Science Society of America Journal*, no. 67, pp. 268-278.

Zha, Y., Y. Gao and S. Ni (2003), "Use of Normalized Difference Built-up Index in automatically zapping urban area from TM imagery", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 3, pp. 583-594.

Zavala Hidalgo, J. (2006), "Seasoanl upwelling on the Western and Southern shelves of the Gulf of Mexico", *Ocean Dynamics*, Springer-Verlag.

Zavala Hidalgo, J. y A. Fernández Eguiarte (2006), "Propuesta para la regionalización de los mares mexicanos desde el punto de vista de los procesos físicos: el caso del Golfo de México", en Córdova y Vázquez, A. (coords.), *Ordenamiento ecológico marino. Visión temática de la regionalización*, INE-SEMARNAT, México.

Zeigler, H. P. and H. J. Bischof (eds.; 1993), *Vision, brain, and behaivor in birds*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Zhou, G., T. Esaki, Y. Mitani, M. Xie and J. Mori (2003), "Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach", *Engineering Geology*, no. 68, pp. 373-386.

Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones revisión y corrección de estilo: Martha Pavón. El diseño y la formación de galeras estuvieron a cargo de Diana Chávez González y Laura Diana López Ascencio, quien supervisó la preparación de la versión digital, realizada por Michelle Mancilla en 2025.

Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones

José Antonio Quintero Pérez
(Coordinador)

Este segundo libro de Geomática nace de la necesidad de difundir y generar un mayor conocimiento al bien llamado "quehacer geométrico" que se realiza en México. Se contó con la participación de investigadores y estudiantes de alto nivel en diferentes ramas de esta disciplina emergente de las siguientes instituciones: Universidad de Búfalo, Instituto Politécnico Nacional, Universidad de Estrasburgo y la Universidad Nacional Autónoma de México.

La Geomática hoy en día es considerada tanto como una ciencia, como un arte, para el manejo de información, ya sea geográfica o no. Los orígenes de esta disciplina están fundados en la fotogrametría y agrimensura evolucionando hasta abarcar diferentes áreas del conocimiento como matemáticas, física, filosofía y geografía de entre muchas otras, convirtiéndose en una ciencia integradora que nos permite estudiar un tema en particular de una forma sistemática y holística generando información nueva que solo a través de esta integración es posible.

Cuando nos referimos al espacio como área de desarrollo, para cualquier tipo de actividad o como un escenario donde eventos y fenómenos toman forma, la Geomática se convierte en un arte, ya que tenemos que representar la realidad en un mundo abstracto mediante algún tipo modelo y, nuevamente, haciendo uso de algún ramo del conocimiento humano, hacer una interpretación.

ISBN 978-607-587-281-0