

Aplicaciones de percepción remota en el inventario y monitoreo de ecosistemas costeros en México.

Joanna Acosta-Velázquez^{1*}, José Reyes Díaz-Gallegos², María Teresa Rodríguez-Zúñiga¹, Sergio Cerdeira-Estrada¹, Carlos Troche-Souza¹, Isabel Cruz¹, Rainer Ressler² y Raúl Jiménez³

¹Subdirección de Percepción Remota, ³Dirección de Geomática, ⁴Dirección General de Bioinformática, CONABIO, Av. Liga Periférico-Insurgentes Sur 4903 Col. Parques del Pedregal, D. Tlalpan. Mexico, D.F., Tel: 5004 5000 Fax: 5004 4931 – *joanna.acosta@gmail.com

²Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Campus del Mar, Carretera Tonalá-Paredón Km 2, Tonalá, Chiapas, México.

Resumen

Los manglares son ecosistemas clave para los ambientes costeros y marinos. México presenta degradación e impactos en sus manglares, sin embargo existen discrepancias entre las estimaciones de la superficie que estos ecosistemas ocupan en México, lo que complica el cálculo de una tasa de deforestación precisa. El objetivo de este estudio fue estimar la distribución actual y la extensión de los manglares en México, con imágenes de satélite de alta resolución y trabajo de campo. Se utilizaron 134 imágenes SPOT-5 del 2005-2006 para el mapeo de la distribución de los manglares. Las imágenes fueron corregidas radiométricamente y georreferenciadas. El análisis digital consistió en un método integral que incluyó la aplicación de algoritmos no supervisados (ISODATA), segmentación de imágenes e interpretación visual, así como datos auxiliares. La exactitud del mapa se evaluó mediante fotografías aéreas utilizando un método original que empleó un muestreo sistemático a través de vuelos en helicóptero a lo largo de la zona costera de México. Se presenta el primer mapa de manglares nacional a escala 1:50,000, con una exactitud global del 90%. La superficie total de los manglares fue de 770,057 ha. Los manglares con la mayor extensión se encuentran en la Península de Yucatán. Este producto es una línea base para la toma de decisiones relacionadas con la conservación de manglares, manejo y vigilancia a largo plazo, además de que es el primer paso para la detección de cambios de los manglares mexicanos y para identificar los agentes de transformación que ponen en peligro a este ecosistema.

Introducción

Los humedales costeros, en particular los manglares, brindan una gran variedad de servicios ambientales importantes para el hombre. A pesar de su importancia ecológica, económica y social, la extensión de los manglares a nivel global se ha reducido aproximadamente en un 35% en las últimas dos décadas; gran parte de esta deforestación se ha asociado con el impacto directo de actividades económicas como camaronicultura y el desarrollo turístico (Valiela *et al.* 2001).

En México, los manglares se distribuyen a lo largo de las costas del Océano Pacífico, Golfo de México y el Mar Caribe, en diecisiete entidades federativas. Existe una amplia discrepancia entre las distintas estimaciones de su extensión (Ruiz-Luna *et al.* 2008), debido a la variedad de métodos y escalas de análisis utilizadas, lo que hace complicado estimar la pérdida-ganancia real de la extensión de los manglares del país. La falta de concordancia entre las cifras reportadas exige tener una estimación reciente -con un nivel de exactitud asociado- de la distribución, extensión y cambios de los manglares de México.

En los últimos quince años, se han desarrollado una serie de trabajos enfocados a la evaluación de la distribución de los manglares en México con técnicas de percepción remota y trabajo de campo. Sin embargo, hasta el momento no se han estandarizado las técnicas adecuadas que permitan determinar con exactitud la extensión y distribución de esta cobertura en el país.

Por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo estimar la extensión y distribución reciente de los manglares de México con técnicas de percepción remota y trabajo de campo. Así como obtener la cartografía escala 1:50,000 que sirva de herramienta a las autoridades e instituciones correspondientes para identificar oportunamente sitios de conservación, manejo o rehabilitación de este hábitat y definir con ello las acciones necesarias para su protección.

Materiales y métodos

1. Área de Estudio

El área de estudio la constituye la franja costera de la República Mexicana en donde se distribuye el manglar (ver Figura 1); se separó en cinco regiones con base en la distribución reportada de los manglares en México y según lo acordado en el II Taller sobre la problemática de los ecosistemas de Manglar en Puerto Vallarta, Jalisco, 2005. Las cinco regiones son: Pacífico Norte (Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit), Pacífico Centro (Jalisco, Colima y Michoacán), Pacífico Sur (Guerrero, Oaxaca y Chiapas), Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco) y Península de Yucatán (Campeche, Yucatán y Quintana Roo).

2. Extensión y distribución de los manglares en México

Se cartografiaron los manglares de tipo arbóreo y arbustivo formados por la asociación de una o más de las siguientes tres especies: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, en el caso de *Conocarpus erectus* solo se cartografió en asociación con al menos una de las tres especies mencionadas. No se consideraron los manglares muertos o dispersos, ni los parches en los que hubiera individuos de manglar pero dominados por otro tipo de vegetación, tampoco se consideraron zonas en proceso de restauración o regeneración.

El mapa fue elaborado con 134 imágenes multiespectrales del satélite SPOT-5¹ (10 m de resolución espacial), el 83% de las imágenes fueron tomadas en los años 2005 y 2006, el resto son del periodo 2003-2007. Estas imágenes fueron rectificadas con las ortofotos digitales del INEGI y corregidas radiométricamente. Además se utilizaron 2 imágenes Landsat-7 ETM para cubrir sólo el 0.1% del total de manglar que no fue cubierto por imágenes SPOT.

Debido a la resolución espectral de las imágenes y a la confusión espectral entre los manglares y otros tipos de vegetación, se aplicaron máscaras con datos auxiliares (Modelo Digital de Elevación del INEGI, diferentes umbrales del Índice Normalizado de Vegetación y trabajo de campo). Posteriormente las imágenes satelitales fueron sometidas a una serie de clasificaciones digitales no supervisadas con el algoritmo iterativo ISODATA (Acosta-Velázquez y Ruiz-Luna, 2007). En el caso de la Península de Yucatán se segmentaron todas las bandas de las imágenes y luego se aplicó un método de clasificación digital supervisada y jerárquica con base en objetos y píxeles (Mather, 1999). El resultado de ambas clasificaciones fueron revisadas y corregidas por interpretación visual, utilizando el compuesto 3,4,2 (RGB). Todos los análisis se hicieron en ERDAS y eCognition.

Se generaron mosaicos de los resultados por región y por zona UTM (proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator). Los mapas producto de la clasificación de imágenes se transformaron a formato vectorial. El área mínima cartografiable para la escala propuesta en el presente trabajo (1:50,000) fue de 10,000 m², por lo que se eliminaron los polígonos menores a una hectárea. Los mapas resultantes a escala 1:50,000 fueron transformados de la proyección cartográfica original UTM a proyección Cónica Conforme de Lambert, Datum

¹ Las imágenes fueron proporcionadas por la Secretaría de Marina, antena ERMEXS

WGS84, esta proyección es adecuada para representar toda la República Mexicana incluyendo la Zona Económica Exclusiva (INEGI, 1987). Todos los análisis se hicieron en ARC/Info.

La evaluación de la exactitud del mapa de los manglares de México se hizo con recorridos de campo a través de vuelos (200m altura) en helicópteros de la Secretaría de Marina, dando cubrimiento a las cinco regiones en las que se dividió el país. En cada región se aplicó un muestreo sistemático (Mas *et al.*, 2003), tomando en cuenta la vegetación de manglar y la vegetación que lo rodea². Los registros de campo se levantaron en forma de zigzag y paralelo a la línea de costa dependiendo de la conformación de la cobertura de manglar, con una cámara digital sincronizada a un GPS y montada en el pedal del helicóptero. El diseño de muestreo sistemático permitió levantar una gran cantidad de puntos de campo, a través del cual se logró verificar una superficie importante de los manglares de México. En cada uno de los vuelos se contó con la participación de un especialista de manglares, quien se encargó de definir las líneas de vuelo en cada región.

En gabinete, los especialistas realizaron la evaluación externa de la exactitud del mapa de manglares a través de una selección sistemática de las fotografías aéreas, las cuales se sobrepusieron con la cartografía de los manglares y las imágenes SPOT (RGB 342). A través de este procedimiento se generaron bases de datos por región, las cuales se recategorizaron a dos clases: Manglar y otras coberturas. La exactitud del mapa se evaluó con dos estimadores: la exactitud global y el coeficiente de Kappa (Congalton y Green, 1999).

Finalmente se generaron estadísticas por entidad federativa y por diferentes criterios de protección- Áreas Naturales Protegidas (Estales y Federales), por sitios Ramsar de Importancia Internacional y GAP Marino (Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México: océanos, costas e islas) con la cartografía oficial de CONANP y CONABIO.

Resultados

El mapa temático de la distribución y extensión de los manglares de México (Figura 1) se produjo con una exactitud global de 90.7% y un estimador del coeficiente de Kappa de 0.809 (± 0.028), a partir de 5743 puntos de control (Fotografías aéreas de alta resolución), ver Tabla 1. La región del Pacífico Centro fue la que obtuvo la mayor exactitud con 95.1%, mientras que el Pacífico Sur obtuvo el 87.8%. Todas las demás regiones estuvieron por arriba del 90% de exactitud global.

Tabla 1. Valores de exactitud estimados para el mapa de los manglares de México.

	Registros	Correctos	Exactitud Global (%)	\hat{K}	Desviación estandar $\pm \hat{K}$
Pacífico Norte	744	677	91.0	0.817	0.028
Pacífico Centro	204	194	95.1	0.827	0.038
Pacífico Sur	1590	1396	87.8	0.820	0.029
Golfo de México	1351	1248	92.4	0.778	0.038
Península de Yucatán	1854	1693	91.3	0.820	0.029
Total México	5743	5208	90.7	0.809	0.028

Nota: \hat{K} : Estimador del coeficiente de kappa

Se estimó un total de 770, 057 hectáreas de manglares en México. La región con mayor cantidad de manglares corresponde a la Península de Yucatán con el 55.02% (423, 571 ha) mientras que la región Pacífico Centro solo obtuvo el 0.86%. En orden de importancia, las entidades federativas con mayor cobertura de manglar son Campeche, Quintana Roo, Yucatán,

² Cualquier cobertura o uso del suelo que se encuentre alrededor de las áreas de manglar.

Sinaloa y Nayarit respectivamente. Las de menor cobertura son Baja California, Michoacán y Jalisco (Tabla 2).

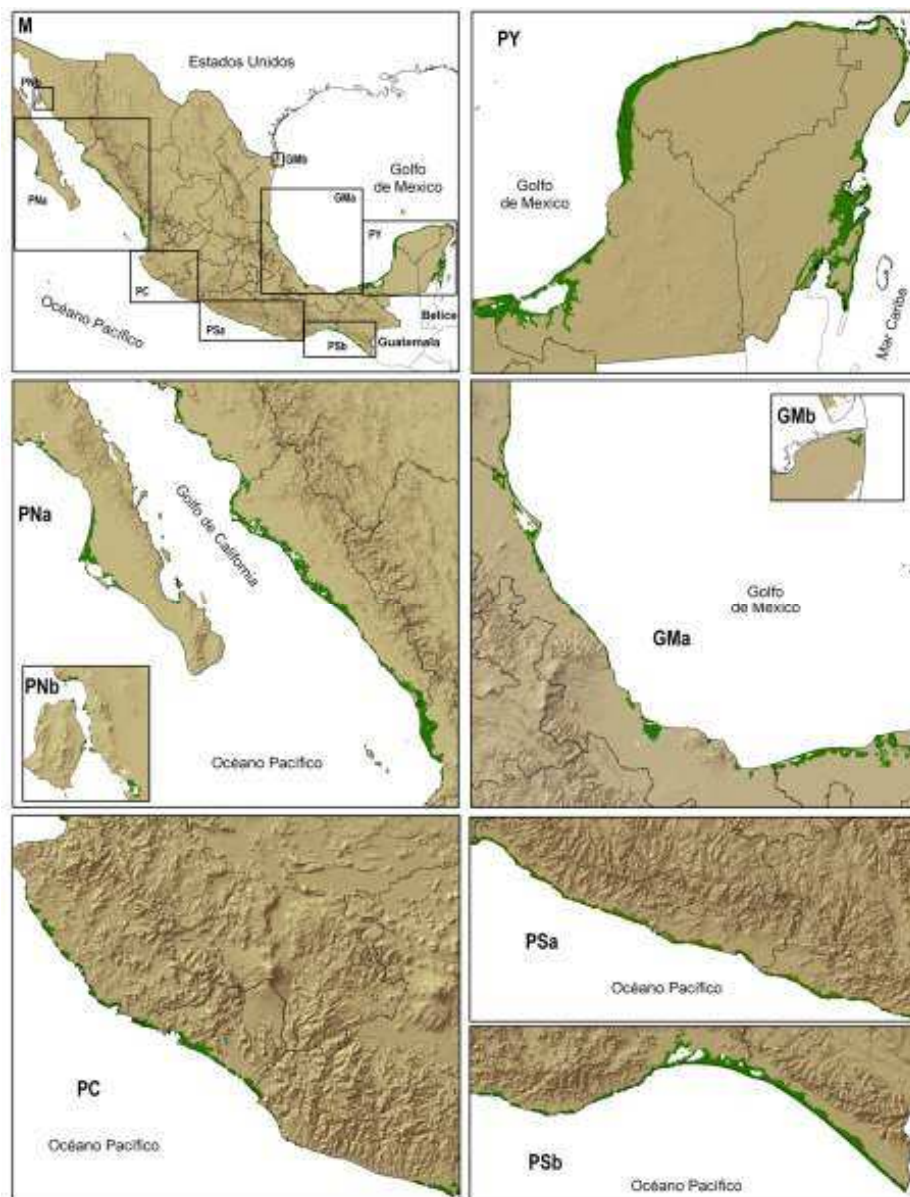


Figura 1. Distribución de los manglares de México. M: México, PY: Península de Yucatán, PN: Pacífico Norte, GM: Golfo de México, PC: Pacífico Centro, PS: Pacífico Sur.

La cartografía permitió determinar que la distribución más norteña de los manglares del país en la costa del Golfo de México se ubica en la desembocadura del Río Bravo en la Laguna Mar Negro, Tamaulipas ($25^{\circ}56'34''N$, $97^{\circ}09'30''S$), mientras que en la costa del Pacífico se localiza en el estero El Sargento, Sonora ($29^{\circ}20'45''N$, $112^{\circ}19'27''$), siendo el límite norte en el continente americano.

Tabla 2. Superficie en hectáreas de la cobertura de los manglares de México por regiones.

Región	Estado	Ha	%	Región	Estado	Ha	%
Pacífico Norte	BC	28	0.00	Golfo de México	Tabasco	45,210	5.87
	BCS	25,851	3.36		Tamaulipas	2,995	0.39
	Nayarit	71,741	9.31		Veracruz	36,237	4.71
	Sinaloa	80,597	10.47	Total	84,442	10.97	
	Sonora	10,682	1.39	Península de Yucatán	Campeche	194,190	25.22
Total	188,899	24.53	Quintana Roo		129,921	16.87	
Pacífico Centro	Colima	3,073	0.40		Yucatan	99,640	12.93
	Jalisco	2,011	0.26		Total	423,751	55.02
Pacífico Sur	Michoacán	1,506	0.20	Total Nacional		770,057	100.00
	Total	6,590	0.86				
Pacífico Sur	Chiapas	41,540	5.39				
	Guerrero	7,538	0.98				
	Oaxaca	17,297	2.25				
	Total	66,375	8.62				

En relación a los sistemas de protección 523, 814 ha de manglar están catalogadas como sitios Ramsar, y solo 413,720 ha se encuentran en Áreas Naturales Protegidas, mientras que el GAP Marino incluye 665,321 ha de manglar (Tabla 3). A nivel de las regiones, la Península de Yucatán resultó con el mayor porcentaje de las tres categorías analizadas, mientras que el Pacífico Norte solo tiene el 7.19 % de los manglares distribuidos en ANPs, identificándose 174,481 ha en el GAP Marino y 128,064 en 30 sitios Ramsar.

Tabla 3. Extensión en hectáreas de los manglares de México con base en categorías de protección. NR: Nivel Regional, NN: Nivel Nacional.

Región	Áreas Naturales Protegidas			Sitios Ramsar			GAP Marino		
	Ha	NR%	NN%	Ha	NR%	NN%	Ha	NR%	NN%
Pacífico Norte	13,582	7.19	1.76	128,064	67.79	16.63	174,481	92.37	22.66
Pacífico Centro	566	8.59	0.07	2,489	37.77	0.32	3,394	51.50	0.44
Pacífico Sur	31,355	47.24	4.07	34,749	52.35	4.51	61,341	92.42	7.97
Golfo de México	14,034	16.62	1.82	35,631	42.20	4.63	75,586	89.51	9.82
Península de Yucatán	354 183	83.58	45.99	322,882	76.20	41.93	350,520	82.72	45.52
Total	413,720		53.73	523,814		68.02	665,321		86.40

Discusión

La respuesta espectral de los manglares varía en función de las asociaciones entre especies, la densidad, altura, presencia de parches de otros tipos de vegetación, la humedad y el tipo de suelo, las condiciones climáticas a la hora de la toma de la imagen, la latitud, las condiciones radiométricas de la imagen junto con la efectividad del proceso de rectificación radiométrica para corregir errores del sensor, la presencia de nubes, y la existencia de una pleamar o bajamar a la hora de la toma de la imagen de satélite, entre otros factores. De igual manera, la respuesta espectral de los manglares muestra similitud con la de otros tipos de vegetación como son otros humedales y otro tipo de vegetación (Acosta-Velázquez y Ruiz-Luna 2007). Sin embargo, el método que se utilizó en este trabajo permitió mapear los manglares de forma consistente y confiable, por la utilización de información auxiliar (MDT, información de campo, índices de vegetación) que permitió tener como resultado un mapa de la distribución de manglares con una exactitud alta.

Con respecto a la estimación de la extensión reciente de los manglares de México, en el presente estudio se estimaron 770,057 ha. Es posible que las discrepancias se deban a los

diferentes materiales y métodos empleados para la estimación de las coberturas (Ruiz-Luna *et al.*, 2008).

Si bien el 54% de la superficie de manglar se encuentra dentro de Áreas Naturales Protegidas federales y estatales, existen entidades como Colima y Guerrero, que no cuentan con este tipo de áreas a nivel federal o estatal que protejan este ecosistema. Aunado a lo anterior, un alto porcentaje (68.02) de los manglares de México están incluidos en sitios Ramsar o están incluidos en el análisis de GAP Marino (86.4%), sin embargo aún es necesario aplicar de manera más efectiva medidas tanto de conservación como de manejo, así como profundizar en su conocimiento integral, sobre todo en aquellos sitios poco estudiados.

Conclusiones

La cifra reportada de 770,057 ha es la más aproximada de la extensión de los manglares de México en el periodo 2005-2006. Hasta la fecha no se había reportado ningún estudio cartográfico detallado (escala 1:50,000) y con un protocolo de validación en campo novedoso que conjuntó el esfuerzo de instituciones académicas y de gobierno.

La cartografía podrá ser utilizada como línea base para realizar estudios más detallados de los manglares del país en el ámbito académico y gubernamental, en los ámbitos de la planeación, conservación y manejo de ecosistemas frágiles. En este sentido la CONABIO está utilizando esta cartografía para conocer las tendencias en la transformación y fragmentación de los manglares de México en las últimas tres décadas.

Las diferencias, en el *método y escala de análisis* de este trabajo con respecto a otros estudios que han estimado la extensión de los manglares del país, no permiten realizar ningún tipo de comparación. Por lo anterior no es correcto realizar estimaciones ni extrapolaciones de tasas de deforestación a nivel nacional, ya que esto llevaría a resultados falsos.

Agradecimientos

A la SEMARNAT y CONABIO que proporcionaron el financiamiento para llevar a cabo este estudio. A todo el personal de la Secretaría de Marina por su apoyo logístico y por la infraestructura proporcionada durante los recorridos realizados para la validación terrestre y aérea de los manglares del país. Al INECOL, A.C., al Colegio de Posgraduados, al CIAD-Mazatlán, Ecosur- Tapachula, al INEGI-Aguascalientes y a la CONAFOR por su disponibilidad y por el intercambio de experiencia e información de manglares a lo largo del proyecto. Al Instituto de Biología-UNAM, Instituto de Ecología-UNAM, INEGI-Culiacán, la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, al Parque Nacional Lagunas de Chacahua, a la U.deG.-CUCSUR y a la Cooperativa Pesquera Cruz de Loreto en Jalisco, CINVESTAV-Mérida, a la UJAT, al Área de Protección de Flora y Fauna Laguna Madre y Delta del Río Bravo, por su apoyo, intercambio de experiencia e información y participación en el trabajo de campo. A Margarita Ascención Merino, por su apoyo en la georeferenciación de las imágenes de satélite.

Bibliografía

- Acosta-Velázquez J, Ruiz-Luna A (2007) Variación en la cobertura, distribución y estructura de los manglares del complejo lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas (1990-2005). En: Funes-Rodríguez R, Gómez-Gutiérrez J, Palomares García R (eds) Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. CICIMAR-IPN, La Paz, Baja California Sur, México, p 127-141
- Congalton RG y K Green 1999. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. Lewis Publishers. Florida. 180 p.
- INEGI 1987. Guías para la interpretación de cartografía topográfica. Edit. INEGI. México D.F.
- Ruiz-Luna A , J Acosta-Velázquez y CA Berlanga-Robles. 2008. On the reliability of the data of the extent of mangroves; a case study in Mexico. *Ocean & Coastal Management* 51: 342-351
- Valiela I, JL Bowen y JK York 2001. Mangrove forests: one of the World's threatened major tropical environments. *BioScience* 51, 10: 807-815
- Mas JF, JR Díaz-Gallegos, A. Pérez. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geográficas*, 51: 53-72.
- Mather P 1999. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. Chichester, John Wiley and Sons. 306 p.