



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO



**ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA ESPACIAL Y ANÁLISIS DE LA
ESTRUCTURA FORESTAL DEL MANGLAR EN SINALOA, MÉXICO,
APLICANDO TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA**

T E S I S

que para obtener el grado académico de:

MAESTRA EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
(BIOLOGÍA MARINA)

Presenta

IDALIA KARINA MONZALVO SANTOS

Director de Tesis:

Dr. Arturo Ruiz Luna

Comité Tutorial:

Dr. Raúl Aguirre Gómez

Dr. Gerardo Bocco Verdinelli

Dr. Francisco Flores Verdugo

Dra. Rosa María Prol Ledesma

Mazatlán, Sinaloa, Marzo de 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*a CARMEN†
(1916-2006)*

a GEMMA e IDOLINA

*a CARLOS
padre,
hermano,
sobrino.*

*Porque hay un continente verde
que imanta nuestras brújulas....
Hay enmarañamientos de raíces
y contorsión de troncos y confusión de ramas.
Hay elásticos pasos de jaguares
proyectados –silencio y terciopelo-
hacia el vuelo inasible de la garza
Aquí parece que empezara el tiempo
en sólo un remolino de animales y nubes.*

Rosario Castellanos

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Arturo Ruiz Luna por la adecuada dirección de esta tesis, compartiendo sus conocimientos conmigo. Gracias por la oportunidad de formar parte del equipo de Manejo Ambiental, por el apoyo para asistir al Diplomado de Manglares en Chiapas y por la paciencia durante estos años.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología Unidad Mazatlán de la Universidad Nacional Autónoma de México y al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Unidad Mazatlán por las facilidades otorgadas para la realización de mi tesis en sus instalaciones.

A los miembros del Comité de tesis conformado por los Doctores Arturo Ruiz Luna, Raúl Aguirre Gómez, Gerardo Bocco Verdinelli, Francisco Flores Verdugo y Rosa María Prol Ledesma por sus acertados comentarios y sugerencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (CECyT) por la beca otorgada para la realización de esta tesis. Al proyecto SEMARNAT-2002-C01-0044 "Distribución y estructura de los ecosistemas de manglar en el noroeste de México y selección de áreas con potencial para restauración y manejo" por el apoyo brindado para desarrollar este trabajo.

A la M. en C. Joanna Acosta Velázquez por la ayuda brindada en la clasificación de imágenes así como en las salidas a campo. Al Dr. Jorge Cid Becerra, a su equipo de trabajo y a la Universidad de Occidente Unidad Mochis por el invaluable apoyo en el trabajo de campo en la zona norte del Estado. A los Doctores Cristian Tovilla y Alicia Villamizar quienes compartieron su conocimiento del manglar, sus enseñanzas durante el diplomado, pero sobre todo por su invaluable amistad.

Al Dr. César A. Berlanga Robles por la ayuda en la búsqueda de artículos indispensables para la realización del presente trabajo. Al Mat. Germán Ramírez y al Ing. Pesquero Rafael Hernández por la asesoría y asistencia en los programas de computo. A Clara Ramírez, encargada de la Biblioteca María Elena Caso, por el apoyo en la búsqueda de información.

A los integrantes del **LAMA**: Arturo, César, Aimee, Pablo, José, Ricardo, Marisol, Serbia, Zumaya, Rafa y Martín por su apoyo, amistad y ayuda en el trabajo de campo, por las risas, las comidas y las galletas compartidas, por hacer que mi estancia en el laboratorio además de educativa fuera muy divertida. Al Pollo y Any por soportarme y compartir su hogar conmigo. A Julián, Alejandra, Rorrigo, Juan José, Alejo, Ericka, Miriam, Toño, Freddy y a los maroles: Alejandro, Roberto e Iván por su invaluable amistad. A los compañeros del Diplomado por las aventuras compartidas, La Encrucijada y por vivir juntos a Stan. A Miriam y Jorge por la hospitalidad durante mi estancia en Los Mochis y por su cariño sincero.

A mi **madre**, que con su inmensa sabiduría e incansable lucha me ha dado el mejor ejemplo, demostrándome que a pesar de las adversidades se puede salir adelante cuando las cosas se hacen con amor. Por apoyar mis decisiones (aunque no todas han sido buenas) y por ser mi mayor orgullo, mi fortaleza, mi hogar. A mi **hermana** por ser el otro pedacito de familia que me hace tan dichosa, por los días de cine y los CD's, por ser la hermana tranquila que necesita la familia. Las amo. A mi padre y mi hermano que son parte importante en mi vida.

A quienes he tenido la dicha de encontrar en el camino y han estado ahí para apoyarme alegrando mis días (aún cuando algunos no fueron muy buenos). Por los momentos gratos -y los ingratos-, por la dicha -y la desdicha-. A esas personas especiales: **Karen** por siempre escuchar (y no cansarte de oír el mismo tema mil veces), por el efecto de las olas, las lagrimas y los días de café, por Vallarta, tu cariño y tu paz... por todo... a pesar de ser rubia; **Joanna** por los días de fango y mosquitos, por Baja y Sonora, por El Amarillo y Coyoacán, por apoyarme tanto en el LAMA, las comidas compartidas, la confianza que tienes en mí y tu incondicional cariño; **Linda** por Minerva y Polito, por las papas, los libros y las pelis, por ser mi familia mazatleca; **Doc Arturo**, por el apoyo, la paciencia y la dedicación, por compartir sus conocimientos, por su alegría, amabilidad y buen humor, pero sobretodo por su amistad; **Marco** por el tiempo y las experiencias compartidas, por crecer juntos, por los PUMAS, el ping-pong, los muchos días felices y las risas; **Paul** por compartir el gusto por el manglar, las charlas a distancia, Joaquín Cortés y por ubicarme en mi error de conceptos; **José** por tus consejos, amistad y confianza, la comida de tu mami, las canciones adecuadas y tu paciencia infinita. Tienen un sitio en mi corazón.

A todas las personas que estuvieron presentes en mi vida durante estos años de aprendizaje y crecimiento, brindándome su cariño sincero, su apoyo incondicional y sus valiosos consejos. A cada uno de ustedes y por supuesto, a Dios, **Gracias**.

CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	iv
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. ANTECEDENTES	8
2.1. Manglar	8
2.2. Percepción remota y manglar	11
3. OBJETIVOS	17
3.1. General	17
3.2. Particulares	17
4. ÁREA DE ESTUDIO	18
4.1. Sistema Ohuira-Topolobampo	19
4.2. Sistema Navachiste	21
4.3. Sistema Santa María-La Reforma	22
4.4. Sistema Altata-Ensenada-Pabellones	23
4.5. Sistema Ceuta	24
4.6. Sistema Urías	25
4.7. Sistema Huizache-Caimanero	26
4.8. Sistema Teacapán- Agua Grande	26
5. MATERIALES Y MÉTODOS	29
5.1. Análisis de imágenes	29
5.2. Clasificación de imágenes: Evaluación de la exactitud y estimación de la cobertura de manglar	33
5.3. Determinación de la estructura forestal	39
5.3.1. Área basal	40
5.3.2. Densidad	41
5.3.3. Dominancia relativa	41

5.3.4. Índice de Valor de Importancia (IVI	41
5.4. Relación estructura forestal – respuesta espectral	43
5.5. Estimación de cambios espaciales y temporales en la distribución de manglar.....	45
5.6. Caracterización del estado actual del sistema de manglar en Sinaloa.....	46
6. RESULTADOS	47
6.1. Estimación de la cobertura de manglar y evaluación de la exactitud de la clasificación	47
6.2. Determinación de la estructura forestal	50
6.3. Relación estructura forestal – respuesta espectral	55
6.4. Estimación de cambios espaciales y temporales en la distribución de manglar.....	57
6.5 Caracterización del manglar	61
7. DISCUSIÓN.....	64
8. CONCLUSIONES.....	73
9. LITERATURA CITADA	75

RESUMEN

Con el objetivo de estimar la extensión que actualmente ocupan los manglares en Sinaloa y para evaluar la magnitud de cambios de la superficie de esta cubierta vegetal a lo largo de un periodo de aproximadamente 30 años, se utilizaron técnicas de percepción remota y trabajo de campo. Ambos procedimientos fueron relacionados para determinar probables relaciones entre la respuesta espectral de la cobertura actual con su estructura forestal determinada *in situ*. Se utilizaron seis imágenes del satélite Landsat ETM+ de fechas recientes (2000-2003) para cubrir la zona costera de Sinaloa, analizándose la cobertura de manglar de siete sistemas lagunares importantes denominados Ohuira-Topolobampo, Navachiste, Santa María-La Reforma, Altata-Ensenada-Pabellones, Ceuta, Urías, Huizache-Caimanero y Teacapán- Agua Brava. La extensión del manglar fue determinada por medio de clasificación supervisada y con la aplicación de un método híbrido que implica técnicas de clasificación no supervisada, se reclasificó al manglar en cuatro categorías diferentes, asociadas con vigor vegetal (cantidad de clorofila) y biomasa, que pueden ser evaluadas indirectamente por su respuesta espectral. Adicionalmente al análisis digital, se realizaron 100 transectos en las principales bahías de Sinaloa para obtener datos de campo para la validación de la clasificación y para determinar la estructura forestal, por medio del método de cuadrantes centrados en un punto. Se evaluaron datos de composición, densidad y área basal por transecto, por sitio y por sistema lagunar. Finalmente se determinó el cambio de extensión del manglar en Sinaloa para un periodo de aproximadamente 30 años, llevándose a cabo un proceso de clasificación de imágenes de 1973, similar al realizado con las imágenes de fechas recientes. Los resultados de la clasificación indican que el mapa final obtuvo valores de exactitud global del 91.2% y alternativamente se evaluó un estimador de Kappa ($\hat{K}= 89\%$), que permitió determinar que existió una elevada concordancia entre los datos de campo y la clasificación de fechas recientes, siendo esta clasificación significativamente distinta de una generada al azar. Se estimó una cobertura total para Sinaloa de 61,955 ha de manglar para fechas recientes, con una pérdida global de alrededor de 3,600 ha en relación a las 65,423 ha resultantes de las escenas de 1973. Las zonas norte y centro presentaron la mayor cobertura de manglar, con más del 80% del total registrado para el estado, donde las mayores concentraciones se presentaron en los sistemas de Topolobampo y La Reforma, mientras que para la zona sur el sistema con mayor cobertura fue Agua Grande, con más de 10,000 ha. La especie dominante para la mayoría de los sitios fue *Avicennia germinans*, seguida de *Rhizophora mangle*, aunque en la zona centro del estado la especie mejor representada fue *Laguncularia racemosa*. Las densidades superiores fueron las estimadas para Topolobampo y La Reforma, con más de 10,000 fustes ha^{-1} . La clasificación de las imágenes recientes en 4 clases de manglar produjeron firmas espectrales que se utilizaron para determinar posibles relaciones de tipo espectral entre los manglares de las diferentes lagunas de Sinaloa. El resultado no es definitivo, ya que si bien hubo separación de tipos de manglar similares independientemente de su localización, también se encontraron resultados que separan a los resultados de una imagen como un grupo con alta afinidad. En el análisis de cluster se encontró una similitud entre estructura y firmas espectrales de mediana a baja dependiendo del sistema analizado. Por lo que respecta a la variación espacial de la superficie de manglar, se pudo determinar que las tasas de deforestación son relativamente bajas, aunque se asume que hay un deterioro en el manglar, que se manifiesta con reducción de cobertura en sitios específicos y con una probable

disminución en los valores de los parámetros de la estructura forestal del manglar. Se concluye que los manglares de Sinaloa tiene una distribución superficial y estructural heterogénea, encontrándose los valores más altos de densidad, área basal y la mayor extensión en la región norte y centro del estado, asociados con los sistemas Ohuira-Topolobampo y Santa María-La Reforma. Adicionalmente se concluye que la especie predominante de manglar en Sinaloa es *A. germinans*, seguida por *R. mangle* y *L. racemosa* en proporciones que varían de acuerdo al sistema lagunar.

ABSTRACT

Remote sensing and field survey methods were used to estimate recent mangrove extent in Sinaloa and to assess the magnitude of change in the surface of this cover along a 30-year period. Both procedures were related to find out probable relationships among spectral responses from the present coverage with the forest structure evaluated *in situ*. Recent data from six Landsat ETM+ satellite images (2002-2003) were used to include the coastal zone of Sinaloa, analyzing mangrove coverage in seven estuarine systems: Ohuira-Topolobampo, Navachiste, Santa María-La Reforma, Altata-Ensenada-Pabellones, Ceuta, Urías, Huizache-Caimanero and Teacapán- Agua Brava. The mangrove extension was determined by means of supervised classification and using a hybrid method, that includes unsupervised classification techniques, the mangrove was later reclassified in four different categories, associated with vegetal vigor (chlorophyll concentration) and biomass, which can be evaluated indirectly by their spectral response. Additionally to the digital analysis, a 100 transect survey was carried out in some of the main coastal systems of Sinaloa to gather field data to assess the accuracy of the classifications and to determine the forest structure, using the point-centered-quarter method. Composition, density and basal area data were evaluated by transect site and lagoon system. Finally, the magnitude of change in Sinaloa's mangrove extension was determined for a 30 years period, using 1973 images that were classified using similar methods to those used for recent images. The final map obtained an overall accuracy value of 91.2% and alternatively it was evaluated an estimate of Kappa coefficient ($\hat{K} = 89\%$) that leads to conclude that exists a high agreement between field data and data from the classification of recent dates, being this classification significantly different from one generated at random. A total of 61,955 ha of mangrove in Sinaloa were estimated for recent dates, with a global loss of approximately 3,600 ha in relation with the 1973 figures. The north and central Sinaloa zones have the main mangrove cover, with more of 80% of the total recorded for the State, with Topolobampo and La Reforma as the systems with the main concentration, whereas Agua Grande represents the main system at the south zone, covering more than 10,000 ha. The dominant specie for most of the sampled sites was *Avicennia germinans* followed by *Rhizophora mangle*, although *Laguncularia racemosa* was the best represented species in the central zone. The highest densities were found at Topolobampo and La Reforma, with more than 10,000 trees ha^{-1} . The classification of recent images in 4 mangrove classes produced spectral signatures that were used to determine possible relationships among spectral signatures from mangrove of the different Sinaloa lagoons. The result is not definitive, although there was separation of similar types of mangrove independently of his location; also there were results that separate the results of an image like a group with high affinity. In the cluster analysis we found medium to low similarity between structure and spectral signatures depending on the analyzed system. Regarding to the spatial variations of the mangrove extent, it was concluded that deforestation rates are relatively low, but even so, it is assumed that there is deterioration in the mangrove cover, displayed as reduction of coverage in specific sites and with a probable diminution in the values of the parameters of the forest structure of mangrove. The conclusion for the present study is that Sinaloa's mangroves have a heterogeneous spatial and structural distribution, with the highest values of density, basal area and extent in the north and central zones, in association with Ohuira-Topolobampo and Santa Maria-La Reforma systems. Additionally, it is concluded that *A. germinans* is the predominant mangrove species in Sinaloa, followed by *R. mangle* and *L. racemosa*, in variable proportions depending on the lagoon system.

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de la zona costera son espacios sujetos a una fuerte presión ambiental y a constantes cambios tanto de origen natural como derivados de actividades humanas, que los colocan en situación de riesgo ya sea por el impacto directo que se ejerce sobre estos sistemas o por los impactos que de manera indirecta provocan las actividades que se llevan a cabo en la parte continental asociada a la zona costera.

De acuerdo con Green *et al.* (1996), más del 50% de la población mundial se concentra dentro de los primeros 60 km a partir de la línea de costa, sin embargo un informe más reciente indica que aproximadamente el 40% de la población mundial se localiza dentro de la franja de 100 km y en el caso de México, esta proporción se reduce a poco menos de 30% (WRI, 2000). Esta alta densidad poblacional de las zonas costeras ha repercutido en transformaciones ambientales drásticas, que se manifiestan como cambios morfológicos, hidrológicos y de uso del suelo. Consecuentemente se han generado alteraciones en la estructura de diferentes comunidades de plantas y animales, así como en el paisaje que ha sido fragmentado y modificado en sus patrones de cobertura (Ojima *et al.*, 1994). En el caso particular de Sinaloa, la agricultura ha sido uno de los principales agentes de transformación de la zona costera, conjuntamente con el crecimiento de las zonas urbanas. Más recientemente, el desarrollo de la camaronicultura en los últimos años, ha incrementado la susceptibilidad de las zonas costeras para recibir impactos que propician cambios en el paisaje (Hernández-Cornejo y Ruiz-Luna, 2000; Ruiz y Berlanga, 2001, 2003).

Dentro de los sistemas costeros, el manglar es una de las comunidades más importantes, tanto por su biomasa como por el alto aporte de materia orgánica que mantiene. Esta comunidad representa zonas de elevada riqueza vegetal y animal en latitudes tropicales (Lugo *et al.*, 1976). El manglar es altamente productivo, funciona como hábitat, y refugio de diversas especies animales y además provee de alimento a invertebrados y peces, muchos de ellos de importancia comercial (Rodelli *et al.*, 1984; Alongi, 2002). A pesar de su evidente importancia, algunos autores señalan que ha habido un deterioro de esta comunidad debido al incremento de su explotación al ser utilizado como recurso comercial o bien para inducir cambios en el uso de suelos. El manglar es extraído para la obtención de leña, carbón, astillas

y pulpa, así como para la elaboración de postes, vigas, durmientes y otros usos en la construcción e inclusive es aprovechado también en la producción de miel y para fines medicinales (Hamilton y Snedaker, 1984; Snedaker y Getter, 1985; Tovilla, 1994; Hernández-Cornejo *et al.*, 2005).

Lo anterior, aunado a las actividades humanas que suelen practicarse en las inmediaciones de este tipo de vegetación (agricultura, ganadería, etc.), han provocado su deterioro, causando problemas ecológicos (i.e. fragmentación del paisaje, incremento de materia orgánica, aumento en las tasas de azolvamiento) sobre esta comunidad y consecuentemente sobre el ambiente costero. Los procesos de envejecimiento del bosque se han acelerado con disminución de los recursos pesqueros y la pérdida de especies nativas, entre otros (De la Lanza *et al.*, 1996, Tam *et al.*, 1997; Valiela *et al.*, 2001).

La conservación de estos bosques es justificable desde diversos puntos de vista ya que los manglares ofrecen múltiples funciones y servicios ambientales, actuando como estabilizadores de la línea de costa, brindando protección contra huracanes, ofreciendo resistencia a la erosión causada por las corrientes de marea y oleaje, reduciendo los daños por inundaciones al actuar como cuencas de captación de agua (Marshall, 1994; Tam *et al.*, 1997). Dentro de su estructura como ecosistemas forman parte importante en el intercambio de materiales y energía con los ambientes que los rodean; garantizan la calidad del agua costera manteniendo los niveles de eutrofización de manera saludable al retener el exceso de nutrientes y liberarlos de manera paulatina (Odum *et al.*, 1982; Flores-Verdugo, 1989), además son sistemas que regulan microclimas (Tiner, 1984) y son de utilidad inmediata para las comunidades que habitan en sus cercanías, como se mencionó anteriormente.

Por otra parte, gracias a su elevada productividad, de hasta $15500 \text{ gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ peso seco reportada para Tailandia (Aksornkoe, 1975), sostienen una compleja cadena alimenticia a partir del detritus proveniente de su hojarasca, colocándose como el escalón inicial en la transferencia de nutrientes (particularmente carbono) entre la zona continental y la oceánica (Lacerda y Schaeffer-Novelli, 1999). Algunos autores como Duarte y Cebrian (1996) señalan al manglar como uno de los mayores ecosistemas productores comparándolo con los arrecifes de coral, microalgas, microfítobentos y fitoplancton. Diversos estudios realizados por Flores-Verdugo *et al.* (1986, 1989) en algunas zonas de Nayarit y Sinaloa reportan una productividad

de entre 1010 y 1263 gC m⁻² de peso seco anual.

Por lo anterior, los sistemas de manglar son objeto de múltiples y variados estudios (p.e. distribución de especies, productividad, estructura forestal, fisiología) debido a su importancia ecológica, así como por representar ambientes de gran dinámica y complejidad. Por ello, se requiere que su estudio se realice desde distintas perspectivas y escalas tanto espaciales como temporales, de tal manera que pueda comprenderse su funcionamiento a nivel local pero también desde una perspectiva más amplia que permita el análisis de los manglares de una manera más completa y global.

Como consecuencia y dada la distribución de este importante recurso, se considera que para determinados tipos de estudio, donde se involucren grandes extensiones de manglar, el uso de técnicas de percepción remota y su integración a sistemas de información geográfica (SIG) permite una visión amplia y sinóptica del paisaje, con suficiente exactitud y con mayor velocidad que los métodos de campo convencionales (Dimiyati *et al.*, 1996; Green *et al.*, 1996). Por ello, aunado a los trabajos que se realizan para conocer aspectos de la fisiología, productividad, estructura y fenología del manglar entre otros, a escala local, las aplicaciones de ambas técnicas permiten el análisis de áreas con mayor extensión, permitiendo ampliar el conocimiento que existe sobre estos importantes sistemas.

Bajo este contexto, y tomando en cuenta que Sinaloa se considera el estado con mayor extensión de manglar en México después de Nayarit y Chiapas (Suman, 1994) y que de acuerdo con Tovilla y Loa (1991), es el estado que presenta la mayor pérdida de estos ecosistemas, con aproximadamente el 33.6% en los últimos 25 años, sin que existan elementos técnicos suficientes para corroborar la veracidad de dichas estimaciones, la finalidad del presente trabajo es por consiguiente generar información actual y confiable que permita cuantificar las modificaciones que ha sufrido el manglar en Sinaloa para un periodo ligeramente menor a 30 años, partiendo de la base de un inventario actualizado.

Al respecto cabe señalar que aunque existe un estudio publicado recientemente sobre la cobertura de manglar en el noroeste del país (Carrera y de la Fuente, 2003), éste está basado en imágenes de 1990 para la mayoría del estado y de 1994 para la parte sur, además de que carece de estimadores de la exactitud de sus resultados y dada la importancia de estos humedales y la velocidad a la que se estima están desapareciendo, es necesario actualizar la

información, incrementando con ello el nivel de confiabilidad sobre las evaluaciones de la extensión de los bosques de manglar en Sinaloa, particularmente considerando los cambios que ha sufrido el paisaje como resultado de eventos naturales y las actividades antropogénicas, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo generar información actualizada sobre la extensión del manglar, utilizando imágenes Landsat ETM+ que datan de los años 2000, 2001 y 2003..

Al mismo tiempo, asumiendo que el análisis digital de imágenes de satélite permite determinar la extensión que cubre este tipo de vegetación, y a fin de establecer la posible relación entre la estructura forestal del manglar y la respuesta espectral derivada del análisis digital, en el presente trabajo se analiza *in situ* dicha estructura en algunas localidades de Sinaloa, a fin de establecer la posible relación entre dicha estructura y la respuesta espectral derivada del análisis digital.

En resumen, el presente trabajo no solamente se concreta a evaluar datos de fechas recientes sobre la cobertura de manglar en Sinaloa, sino que intenta contribuir con información sobre la dinámica de esta cobertura para un periodo de aproximadamente 30 años, en función de la información disponible, tanto a nivel global como por sistemas lagunares estuarinos, realizando una evaluación del cambio que ha sufrido el manglar por medio de la comparación de imágenes Landsat MSS de 1973 con ETM+ de los años 2000, 2001 y 2003 y finalmente contribuir a futuras evaluaciones y estudios de este importante ecosistema al establecer la posible relación entre respuesta espectral y estructura forestal.

2. ANTECEDENTES

Como ya se ha señalado, la relevancia del manglar tanto a nivel ecológico, como económico e inclusive cultural es innegable, por lo que ha sido objeto de estudio por parte de numerosos investigadores de varias disciplinas tanto a nivel internacional como nacional. Dadas sus características, su importancia y los servicios y beneficios que estas comunidades ofrecen, se hace necesario que, para su comprensión e integración, los estudios que sobre manglar se efectúen sean enfocados desde distintas perspectivas y con diversas escalas, por lo que se presentan a continuación algunos de los trabajos más importantes, particularmente asociados con la zona de estudio, que servirán como marco de referencia para el presente trabajo.

2.1. Manglar

La comunidad de manglar puede definirse como la vegetación de forma arbórea y/o arbustiva que desarrolla raíces aéreas (adventicias, neumatóforos) y que presentan cierto grado de viviparidad. Los manglares se caracterizan por estar adaptados a hábitats salinos, de sedimentos ricos en materia orgánica y por lo tanto en condiciones reductoras y sujetos a inundaciones periódicas por mareas. En términos generales, se localizan en las zonas intermareales de baja energía de corrientes y oleaje, en lo que corresponde al ecotono entre el medio marino y el terrestre, principalmente en las regiones tropicales y subtropicales. Este tipo de vegetación es dominante en los bordes de lagunas costeras y esteros, constituyendo entre el 60% al 75% del total de la vegetación dentro de esos sistemas. A nivel mundial están formados por unidades taxonómicas muy diversas, agrupadas aproximadamente en 12 familias que comprenden más de 50 especies (McGill, 1969; Chapman, 1970).

Por lo que corresponde a su a su cobertura, de acuerdo con diversos autores se estima una extensión aproximada de 120,000 a 200,000 km² de manglares en el mundo (Field, 1999; Mitsch y Gosselink, 2000; Valiela *et al*, 2001; FAO, 2003). México es considerado como uno de los países con mayor extensión de manglares, con estimaciones variables que van de 4,880 km² (Suman, 1994) a más 9,000 km² (FAO, 2005).

Con respecto a la diversidad, para las costas de México, Tomlinson (1986) señala la

presencia de tres especies ampliamente distribuidas en el país: *Rhizophora mangle* L. (mangle rojo, Fam. Rhizophoraceae), *Laguncularia racemosa* L. Gaertn. F. (mangle blanco, Fam. Combretaceae) y *Avicennia germinans* L. Stearn (mangle cenizo o negro, Fam. Avicenniaceae). Otros autores consideran también como mangle a la especie *Conocarpus erectus* L., perteneciente a la familia Combretaceae (Flores-Verdugo, 1989; López-Portillo y Ezcurra, 2002), aunque suele considerarse como mangle no verdadero debido a que no presenta las características fisiológicas propias de los manglares. Esta especie es conocida como botoncillo, botoncahue o falso manglar. Al respecto cabe mencionar que los nombres comunes asociados a estas especies varían de acuerdo a la región. Por otra parte, se ha reportado la presencia de *Rhizophora harrisonii* Leech otra especie de mangle rojo, en Chiapas (Rico-Gray, 1981).

La distribución de los manglares depende entre otras causas de la morfología, hidrografía, clima, micro-topografía, de los componentes del sustrato y la salinidad (Tomlinson, 1986). Se ha indicado que existe una zonación en los manglares relacionada a los diferentes grados de inundación, a los componentes del sustrato y a la salinidad, con una tendencia general de la concentración de *Rhizophora* en la parte próxima al canal, distribuyéndose después en franjas con alturas decrecientes hasta que inicia la distribución de *Laguncularia* y *Avicennia*, tornándose menos densa e irregular, hasta su completa dispersión en la porción mas alejada de los cuerpos de agua. Este aspecto no es regular, en la mayoría de los casos y depende de los factores anteriormente señalados (Tomlinson, 1986; Herz, 1999).

Con respecto a los estudios realizados en México sobre esta vegetación, existen importantes contribuciones relacionadas con su distribución (Montes-Cartas *et al.*, 1999; Tovilla, 1994), estructura forestal (Pool *et al.* 1977, Cole *et al.*, 1999; Arreola-Lizárraga *et al.*, 2004), productividad (Espinoza *et al.* 1981; Flores-Verdugo *et al.*, 1986; 1987; Day, *et al.* 1987; Tovilla, 1994; Wafar *et al.*, 1997), zonación (López-Portillo y Escurra, 1988), ecología (Flores-Verdugo *et al.*, 1990, 1993), reforestación (Field, 1998), impacto y usos (Kovacs, 1999; Valdéz-Hernández 2002; Hernández-Cornejo *et al.*, 2005) y su relación con la camaronicultura (Ruiz y Berlanga, 2001; Alonso *et al.* 2003), entre otros.

En términos de la estructura forestal, entre los estudios realizados en México, se encuentra el de Corella-Justavino *et al.* (2004) quienes realizaron la caracterización de cuatro

rodales de mangle en el noroeste de Tabasco por medio de tres índices de valoración de la estructura forestal y cuantificaron su incremento en diámetro y altura. Los resultados obtenidos mostraron que *Rhizophora mangle* fue la especie con mayor densidad, mientras que los individuos de *Laguncularia racemosa* presentaron el mayor incremento en altura y diámetro en relación al resto de las especies de manglar de la zona. También en términos de la estructura forestal y análisis del potencial para explotación, Valdez-Hernández (2002) mostraron el efecto resultante de la cosecha de madera en la estructura y repoblación natural de manglares en el estado de Nayarit, observándose que a excepción de *Laguncularia racemosa*, no hubo diferencia significativa entre los rodales cosechados y los no cosechados, manteniendo similares los valores estructurales para los diferentes bosques de mangle.

Por su parte, Kovacs *et al.* (2001a) con ayuda de un modelo de regresión estudiaron los efectos causados en 1994 por el huracán Rosa sobre el bosque de manglar en la zona de Teacapán-Agua Brava. Los resultados demostraron que la especie menos afectada fue *Rhizophora mangle* con un 65% de árboles en buenas condiciones, mientras que *Laguncularia racemosa* fue la especie más dañada con únicamente el 34% de árboles en condiciones favorables.

También en Nayarit, Kovacs (1999) realiza una evaluación a nivel local en el área de Teacapán-Agua Brava sobre los posibles usos que le dan los lugareños al manglar, encontrando que *Rhizophora mangle* fue la especie preferida para la construcción, como recurso medicinal y en la obtención de taninos, mientras que *Laguncularia racemosa* fue la especie que más se utiliza como leña y en la producción de sal. Para otras regiones del noroeste de México caben destacarse los trabajos de González-Zamorano (2002) para la Paz, B.C.S., de Arreola-Lizarraga *et al.* (2004) para Sonora.

En particular para Sinaloa, es importante mencionar los trabajos realizados por Flores-Verdugo *et al.* (1986, 1987 y 1990) sobre estructura, ecología y productividad primaria en manglares. Asimismo, Agraz-Hernández (1999) y Bojórquez-Leyva (2002) han realizado trabajos sobre reforestación y estructura forestal, mientras que Berlanga-Robles (1999), Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (1998, 2002), Berlanga-Robles *et al.* (2004, 2005), Alonso *et al.* (2003), Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (1998, 1999a,b, 2003) y Hernández-Cornejo *et al.* (2005),

entre otros, han estudiado al manglar con un enfoque de paisaje, en diversas regiones de Sinaloa.

2.2. Percepción remota y manglar

La percepción remota (PR) es la técnica que permite el análisis visual y digital de los objetos que se encuentran sobre la superficie de la tierra, empleando la energía electromagnética (luz, calor, ondas de radio) por medio de la cual es posible detectar, procesar e interpretar las características de dichos objetos a distancia (Sabins, 1996).

La información que es registrada por los satélites se genera por la interacción de la radiación electromagnética y la superficie de la tierra cuando ésta es iluminada por una fuente de energía externa y posteriormente es captada por sensores instalados sobre satélites o plataformas aéreas (Green *et al.*, 1996). Esta metodología permite una rápida y efectiva aplicación a la solución de problemas de manejo y planeación territorial, evaluación de condiciones naturales e impacto ambiental (Lillesand *et al.*, 2004), entre otros.

El uso de las técnicas de PR para observación de la superficie terrestre inició a principios de la década de los 60, con la puesta en órbita del satélite meteorológico TIROS (Campbell, 1996). En 1972 con el lanzamiento del satélite ERTS-1 (posteriormente denominado Landsat 1) se consolidó la técnica de percepción remota orientada al análisis de características de la superficie terrestre y a partir de 1975, cuando fue puesto en operación el satélite ERTS-2 (posteriormente conocido como Landsat 2), se inició su acceso público, convirtiéndose en la herramienta de usos múltiples y de gran utilidad que es actualmente (Chuvienco, 1996).

Los sensores con mayores aplicaciones para el estudio de ambientes terrestres y de sistemas costeros y oceánicos se clasifican en dos grandes grupos: satélites con órbita geoestacionaria y satélites con órbita cuasipolar (Green *et al.*, 2000). Los satélites de órbita geoestacionaria tienen menor resolución con píxeles de al menos 100 m y son particularmente eficaces para el registro de parámetros meteorológicos, temperatura de la superficie oceánica, concentración de clorofila, escala de color en el océano, destacando los satélites GOES, Metsat y GMS, entre otros.

Los satélites de órbita cuasipolar presentan una mayor resolución espacial y son más apropiados para obtener información cuantitativa sobre la distribución espacial de distintos rasgos ambientales, útiles para aplicaciones en cartografía, detección de cambios y batimetría, entre otro. Los más utilizados han sido los sensores instalados en los satélites Landsat y SPOT, que por otra parte cuentan con las series temporales más completas. Actualmente existen satélites con resolución espacial mayor como son: Ikonos y QuickBird los cuales ofrecen una resolución para sus productos multiespectrales de 4m y <3m, respectivamente en el modo multiespectral, con un número de bandas y resolución espectral similar o, para ciertos fines, más limitada que la de los satélites de la constelación SPOT, por lo que con respecto a Landsat esto se traduce en información más limitada en cuanto a nivel espectral se refiere, además de tener un costo superior por unidad de superficie.

Pese a la utilidad de esta herramienta y a los avances logrados en poco más de 30 años de desarrollo tecnológico en PR, aún se requiere del registro de información en campo u otro tipo de información auxiliar (mapas, fotografía aérea) para su validación. Para determinar la validez de los datos procedentes de PR existen métodos que permiten estimar la exactitud de las clasificaciones, con base en el análisis de una matriz de error. Este tipo de análisis permite conocer la exactitud en dos categorías: exactitud individual por categoría y la exactitud global de la clasificación (Congalton y Green, 1999). La evaluación de la exactitud de la información obtenida por PR es necesaria, ya que permite identificar y corregir las fuentes de error.

La percepción remota se ha distinguido como una técnica que permite una evaluación rápida y eficiente de los elementos que constituyen el paisaje, susceptible de error como también lo son otras técnicas tradicionalmente utilizadas, incluyendo las evaluaciones *in situ*, cuyo costo es proporcionalmente más elevado que el requerido por las aplicaciones de PR.

Por lo anterior y dada la dificultad de evaluar de manera directa la cobertura de manglar en áreas de considerable extensión o de difícil acceso, las técnicas de PR se están convirtiendo en un medio cada vez más utilizado para estudiar estos sistemas en diversas partes del mundo, obteniendo estimaciones en la extensión, variación temporal y espacial, patrones de distribución y estructura del manglar como lo muestran los trabajos realizados por Manson *et al.* (2001, 2003), Herz (1999), Wang *et al.* (2004) y Kovacs *et al.* (2004, 2005).

En México la PR ha sido utilizada para estudios de cobertura vegetal, entre otras, en

áreas costeras, siendo el trabajo de De la Lanza *et al.* (1993) uno de los primeros en aplicar estas técnicas, con imágenes Landsat MSS, para determinar el área de cobertura de la vegetación de manglar en la laguna de Términos, Campeche. Los autores concluyen que existe una heterogeneidad en la distribución y asociación de las especies, sin ningún patrón de zonificación representativo; además lograron determinar que la asociación formada por *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans* es la dominante al suroeste de la laguna y que *Rhizophora mangle* se presenta de manera irregular en bandas estrechas en el sistema lagunar.

En esta misma laguna, Mas (1997) compara la eficiencia de seis técnicas para detectar cambios en su cobertura terrestre usando imágenes de satélite del sensor MSS de 1974 y 1992, encontrando que la mayor eficiencia de clasificación se logra mediante el uso de la técnica de comparación post-clasificatoria, avalada por la alta exactitud lograda tanto en la clasificación de 1974 como en la de 1992.

Para la costa del Pacífico, en Nayarit, Ramírez-García *et al.* (1998) estimaron la superficie y los cambios en la cobertura vegetal de la desembocadura del río Santiago utilizando una imagen Landsat TM de 1993, cartas de uso de suelo y topografía de 1970 y fotografía aérea de 1973. Reportaron que en el periodo de 1970 a 1993 la cobertura de manglar disminuyó en un 30%, la selva baja caducifolia perdió el 70% y la parte terrestre cubierta de pastizal aumentó en un 300%.

Dentro de la misma región, De la Lanza *et al.* (1996) evaluaron las características geológicas, e hidrológicas de las cuencas que drenan en sistema Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales. Kovacs *et al.* (2001b, 2005) estimaron la extensión del manglar para esa misma zona, además de determinar valores de índices de vegetación (LAI, NDVI), por medio de imágenes Landsat TM e IKONOS de diferentes épocas. También en Nayarit, Acosta-Velázquez (2003) estudió las condiciones actuales y la tendencia de cambio del manglar en la zona de Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales por medio de imágenes Landsat (1990-2000) y métricas del paisaje. Los resultados obtenidos señalan una tasa de deforestación media anual del 1.48%.

Uno de los estudios más recientes sobre la extensión de manglar con ayuda de imágenes satelitales, es el realizado por Carrera y de la Fuente (2003) quienes determinaron la extensión y distribución de las principales coberturas de suelo de la zona noroeste del país,

obteniendo una estimación de la cobertura de manglar en Sinaloa por medio de clasificación no supervisada de 4 imágenes Landsat de 1990 y 1994.

Previo a este trabajo, en el Laboratorio de Manejo Ambiental del CIAD, institución dentro de la cual se desarrolló el presente estudio, se han efectuado diversos trabajos sobre el paisaje costero de Sinaloa, incorporando al manglar como una de las categorías a evaluar por medio de percepción remota. Destacan los trabajos de Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (1998), Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (1998, 1999a, 1999b), Berlanga-Robles (1999), Lieberknecht (2000), Martín (2000), Alonso (2000) y Trelles (2002), entre otros.

De los anteriores, Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (1998) evaluaron las coberturas de espejo de agua, manglar, suelos, agricultura y selva baja caducifolia en el sistema lagunar Huizache-Caimanero para los años 1973, 1986, 1992 y 1997, mediante el procesamiento de imágenes de satélite Landsat MSS, reportando que la actividad agrícola presentó un aumento del 41% ocasionando el desplazamiento directo e inmediato de las coberturas de manglar y selva baja. Berlanga-Robles (1999) evaluó la tendencia de cambios en la extensión de las lagunas y esteros, así como los patrones de cobertura y estructura vegetal del terreno, del sistema Laguna Grande, Agua Grande Teacapán, Sinaloa mediante comparaciones post-clasificadorias y el uso del índice normalizado de vegetación (NDVI) de cuatro subescenas de las imágenes de satélite Landsat de los años 1973, 1986, 1990 y 1997. Observó que la cobertura de manglar en el sistema es de 16,316 ha y se mantiene casi constante con una tasa de deforestación anual de 0.31%.

Por su parte Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (1999b) analizaron las modificaciones que han ocurrido alrededor del sistema lagunar Huizache-Caimanero mediante un análisis multitemporal con imágenes de satélite MSS de 1973 y 1986 y TM de 1990 y 1997. Utilizaron como indicadores de campo las coberturas de manglar, selva baja caducifolia, marisma, espejo de agua, agricultura y vegetación secundaria. Encontraron que la agricultura, el crecimiento de pueblos, el cultivo de cocos, y el desarrollo de pastizales para la ganadería han afectado la cobertura de la selva baja caducifolia y manglar, ocasionando que actualmente este sistema lagunar y su entorno presenten extremas perturbaciones en su paisaje, con un alto grado de fragmentación en sus coberturas vegetales.

Otros trabajos realizados en Sinaloa que involucren aplicaciones de PR y estimaciones

de manglar son los realizados por Ramírez-Zavala (1998) quien evaluó los cambios sufridos en el Estero de Urías durante un periodo de 23 años utilizando imágenes Landsat y cartografía, reportando un cambio en la extensión del manglar, con una disminución del 6.63% de las 673.2 ha estimadas en 1973. Para la zona norte del estado, Gurrola-López (2000) analizó los cambios de cobertura del sistema lagunar Santa María por medio de análisis multitemporal donde reporta un incremento de la agricultura en mas de 54% ocasionando la pérdida de selva, halófitas y zonas de inundación. Registra además, 11,678 ha de manglar para el año 1973, las cuales se ven incrementadas en un 4.37% para el año 1992 (12,212 ha). Por su parte, Martínez-Santos (2003) evaluó las tendencias de cambio de usos de suelo con imágenes Landsat de los años 1973, 1986 y 2000, registrando incremento en las clases agricultura y poblados, en contraste, registra un descenso en la cobertura de las clases de vegetación secundaria, suelos, playas y marismas. Para manglar, reporta una pérdida del 3.5%, con un total de 14,137 ha en el año 2000.

Finalmente cabe mencionar que, como complemento a la tecnología de percepción remota, el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten el manejo, procesamiento e interpretación de los datos de forma eficaz y rápida (Bocco *et al.*, 1991), por lo que se incorpora en este estudio como un elemento más para la evaluación de los cambios en la cobertura de manglar y el análisis de su distribución a lo largo de la costa de Sinaloa. Los SIG, definidos como el conjunto de programas, equipo de cómputo y personal especializado que permiten optimizar el acopio, recuperación, manipulación, transformación y despliegue de datos espaciales y no espaciales provenientes de varias fuentes temporal y espacialmente diferentes (Nath *et al.*, 2000), permiten el análisis de información espacialmente referida.

Una vez que se generan mapas temáticos con niveles de exactitud adecuados, apoyan la solución de diversos problemas territoriales, al facilitar la generación de inventarios, programas de manejo de los recursos naturales, control y gestión de propiedad urbana entre otras disciplinas en las que sea necesario manejar información espacial (Bosque, 1992).

En particular para Sinaloa, el antecedente más importante en cuanto al desarrollo de SIG, es el que corresponde a Aguilar-Manjarrez (1996) quien desarrolló un sistema para evaluar sitios aptos para la instalación de granjas acuícolas en la zona costera de Sinaloa. Con relación al manglar y la percepción remota, únicamente se cuenta con el antecedente de

Trelles-Ríos (2002), quien además de manglar incluye otros usos de suelo y analiza sus cambios en un periodo de aproximadamente 25 años, para el municipio de Ahome, al norte del estado.

Para el presente trabajo solamente se pretende integrar la información generada a un sistema de información básico que además de los productos generados por la clasificación de imágenes, permita el análisis posterior a diversos niveles (estatal, regional, municipal, por sistema).

3. OBJETIVOS

3.1. General

Estimar la cobertura espacial actual de los sistemas de manglar en Sinaloa y evaluar los probables cambios en la extensión sufridos en un periodo cercano a 30 años, aplicando técnicas de percepción remota, relacionando la respuesta espectral de la cobertura actual con su estructura forestal.

3.2. Particulares

1. Estimar la cobertura reciente de los sistemas de manglar de Sinaloa por medio de clasificación de imágenes Landsat ETM+ de los años 2000, 2001 y 2003.
2. Determinar la estructura forestal (composición, área basal y densidad) del manglar en los principales sistemas lagunares estuarinos de Sinaloa.
3. Evaluar las posibles relaciones entre la estructura del manglar y su respuesta espectral.
4. Estimar los cambios espaciales y temporales en la distribución de manglar a través del análisis comparativo entre las imágenes MSS del año 1973 y las imágenes ETM+ de los años 2000, 2001 y 2003.
5. Caracterizar el estado actual del sistema de manglar en el Estado, con base en su distribución, estructura forestal y tendencias de cambio.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El estado de Sinaloa se extiende entre los paralelos 22° 29' y 27° 02' Norte y los meridianos 105° 23' y 109° 28' Oeste y representa el 2.9% de la superficie del país (Figura 1). Se encuentra limitado al norte por Sonora y Chihuahua, al este por Chihuahua y Durango, al sureste por Nayarit y al oeste por el golfo de California. Su superficie es de aproximadamente 58,092 km², cuenta con 608 km² de superficie insular, 17,751 km² de plataforma continental, 221,600 ha de lagunas litorales y 57,000 ha de aguas continentales (INEGI, 2003).

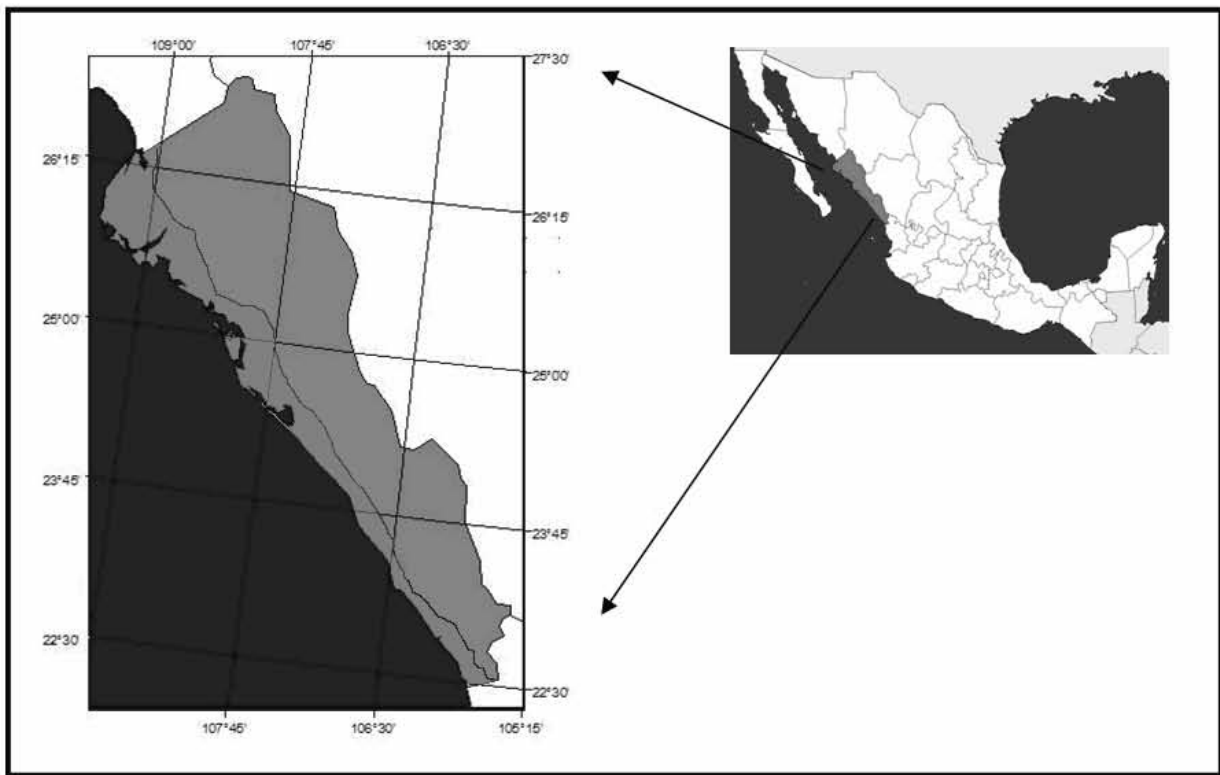


Fig. 1. Localización del área de estudio. Zona costera de Sinaloa, México (en rojo).

Sinaloa posee un vasto litoral que abarca 656 km. La zona litoral del estado se extiende desde la desembocadura del Arroyo del Chino, al norte de Agiabampo, hasta la boca de Teacapán, exactamente en la albufera del Caimanero donde desemboca el río de las Cañas, llamado

también Bayona o Teacapán en la porción sur del estado. Se ubican a lo largo del estado 12 bahías, 15 esteros, 14 marismas, 2 lagunas y una ensenada (INEGI, 2003).

Los escurrimientos superficiales provenientes de las Sierra de Chihuahua y Durango y la distribución de los volúmenes de agua de los ríos a lo largo del estado, definen la hidrografía de Sinaloa, que presenta once corrientes principales (ríos Elota, Baluarte, Cañas, Mocorito, Piaxtla, Sinaloa, Humaya, Tamazula. Fuerte, San Lorenzo y Presidio) que aportan un escurrimiento medio anual de 15,169 millones de m³, en un área de cuencas de 92,013 km² (INEGI, 2003).

Dada la extensión y morfología de Sinaloa, en la zona costera de este estado se puede observar una diversidad de ambientes, predominando los climas áridos (BS), con excepción de las áreas de Topolobampo y Mazatlán en donde el clima es muy árido (BW) y cálido húmedo con lluvias en verano (AW) respectivamente (García, 1973, Olea 1975). A lo largo del estado los periodos de lluvia están bien definidos y ocurren de junio a octubre. La temperatura media registrada es de 25°C, con precipitación que varía de 200 a 600 mm (INEGI, 2003).

La zona costera cubre ocho sistemas lagunares principales, además de cuerpos de agua de menor tamaño, los cuales se ubican principalmente en las porciones norte y centro del estado y son sitios de gran importancia por la variedad de especies que los habita, además de tener importancia a nivel económico por las actividades que en ellas o en su vecindad se realizan (pesca, camaronicultura, agricultura, ganadería,). Los principales sistemas se describen a continuación.

4.1. Sistema Ohuira-Topolobampo

Se localiza en la costa noroeste, entre los 25°32' y 26°09' de latitud norte y los 108°50' y 109°25' de longitud oeste. Este sistema lagunar se encuentra en el municipio de Ahome, y está constituido por la bahía de Topolobampo, la bahía de Ohuira, y el estero de Lechugilla que a su vez está conectado con la bahía de Santa María al oeste, por un canal de mareas (Fig. 2). La bahía de Topolobampo tiene un ancho promedio de 5 km, se encuentra separada de la bahía de Ohuira por un canal de 700 m de ancho. El estero de Lechugilla se extiende paralelo a la costa en una dirección noroeste por una distancia aproximada de 15 km y tiene alrededor de 2 a 3

km de ancho, encontrándose separado de la bahía de Topolobampo por un canal de 800 m de ancho. De acuerdo al sistema de clasificación de Lankford (1977), estas lagunas corresponden al tipo I-C y II-A, descritas como lagunas costeras asociadas con el aporte fluvial, con barreras de arena, depresiones intradeltáicas y marginales, salida de agua poco frecuente o ausente y sedimentación terrígena diferencial. Recibe aportes de los efluentes urbanos e industriales generados en Topolobampo. Es un área muy seca, cálida con temperatura media anual mayor de 22° C y menor de 18° C para el más frío, con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total anual. La precipitación promedio anual es de 240.9 mm, siendo septiembre el mes más lluvioso. Este complejo se comunica al mar a través de una boca de 3 km localizada entre la Isla Santa María y Punta Copas (Green-Ruiz, 2000).

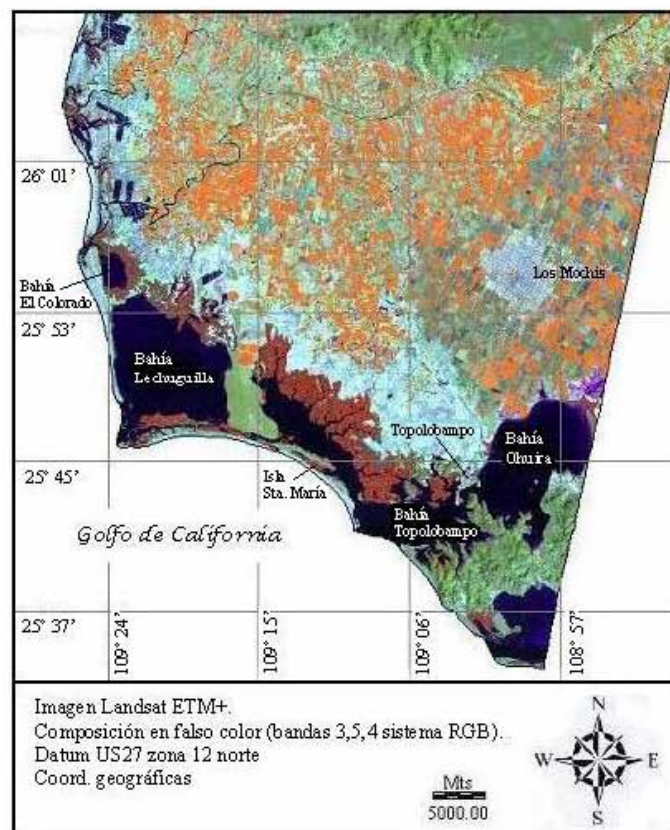


Fig. 2. Sistema lagunar Ohuira-Topolobampo

4.2. Sistema Navachiste

Localizado entre los 25°20' y 25°35' de latitud norte y 108°36' y 109°05' de longitud oeste (Fig. 3). Se ubica entre los municipios de Ahome y Guasave lo conforman tres bahías principales: San Ignacio, Navachiste y Macapule las cuales están parcialmente cerradas por la isla San Ignacio y comunicadas por dos bocas con el golfo de California. La extensión de las bahías es de 2,700 y 21,400 y 2,600 ha respectivamente (Contreras-Espinosa, 1993) con una profundidad media de 4 m. Posee una barrera arenosa de 23 km de largo e incluye 8 islas principales (INEGI, 1999) y pertenece a la clasificación II-A y III-A de Lankford (1977) definidas como lagunas costeras asociadas con el aporte fluvial, con barrera Gilbert de Beaumont constituida por barras arenosas extensivas, de baja energía y salinidad variable de arena, con depresiones intradeltáicas, de baja salinidad y presencia de sedimentos terrígenos. En torno y dentro de este complejo lagunar se desarrollan actividades agrícolas, pesqueras, acuícolas y turísticas (Contreras-Espinosa, 1993).

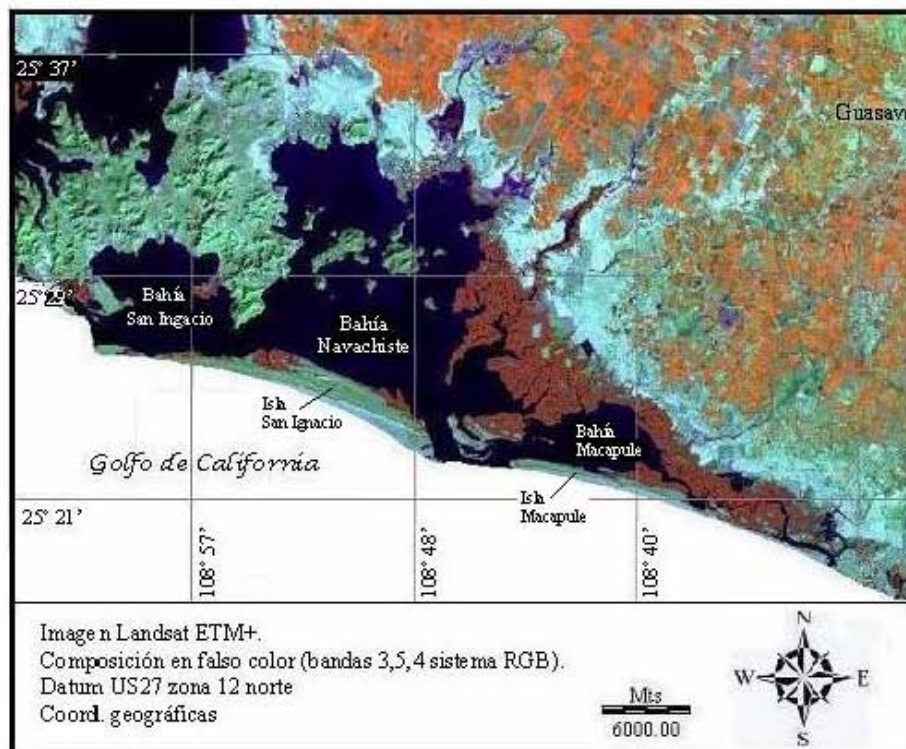


Fig. 3. Sistema lagunar Navachiste

4.3. Sistema Santa María-La Reforma

Este sistema es el más grande de Sinaloa y está ubicado entre los 24°30' y 25°30' N y los 107°45' y 108°55' W (Fig. 4). Lo conforman las bahías Playa Colorada y Santa María y una serie de islas e islotes. Es un sitio de gran importancia ecológica al formar parte del corredor de aves migratorias del Pacífico. Playa Colorada se ubica al norte del sistema y está semicerrada por Punta Perihuate, la isla Saliaca y el islote El Rancho. Santa María, cubre la mayor extensión del sistema con 45,000 de las 51,000 ha que lo conforman y está separada del golfo de California por Altamura, barra arenosa de 32 km de longitud y 11 km de ancho (Contreras-Espinoza, 1993; INEGI, 2003) La profundidad máxima es de 24 m y la profundidad media es de 7 m. Su clima va de semiseco a seco muy cálido, con temperatura media anual de 24.2 ° C y una precipitación promedio anual de 433.8 mm, con las mayores lluvias en verano y escasas en invierno (INEGI, 1999). Este sistema está ubicado en la categoría III-A y III-C de la clasificación de Lankford (1977) definidas como lagunas de tipo Gilbert de Beaumont, con baja energía, salinidad variable, salida de agua ausente, batimetría baja y presencia de sedimentos terrígenos. Su orientación es paralela a la línea de la costa.

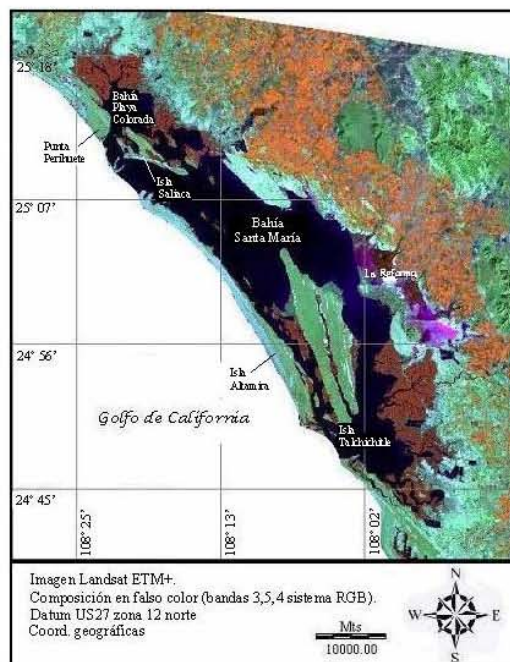


Fig. 4. Sistema Lagunar Santa María-La Reforma

4.4. Sistema Altata-Ensenada-Pabellones

Está localizado entre los 24°19' y 24°41' de latitud norte y los 107°28' y 108° de longitud oeste y en él se ubica la bahía de Altata y el complejo estuarino Ensenada-Pabellones (Fig. 5), además de las lagunas Caimanero, Bataoto y Chiricahueto las cuales están conectadas al sistema a través de meandros. Altata tiene una extensión aproximada de 760 ha y la bloquean parcialmente en la porción este la isla de Redo y al oeste la Península de Lucenilla.

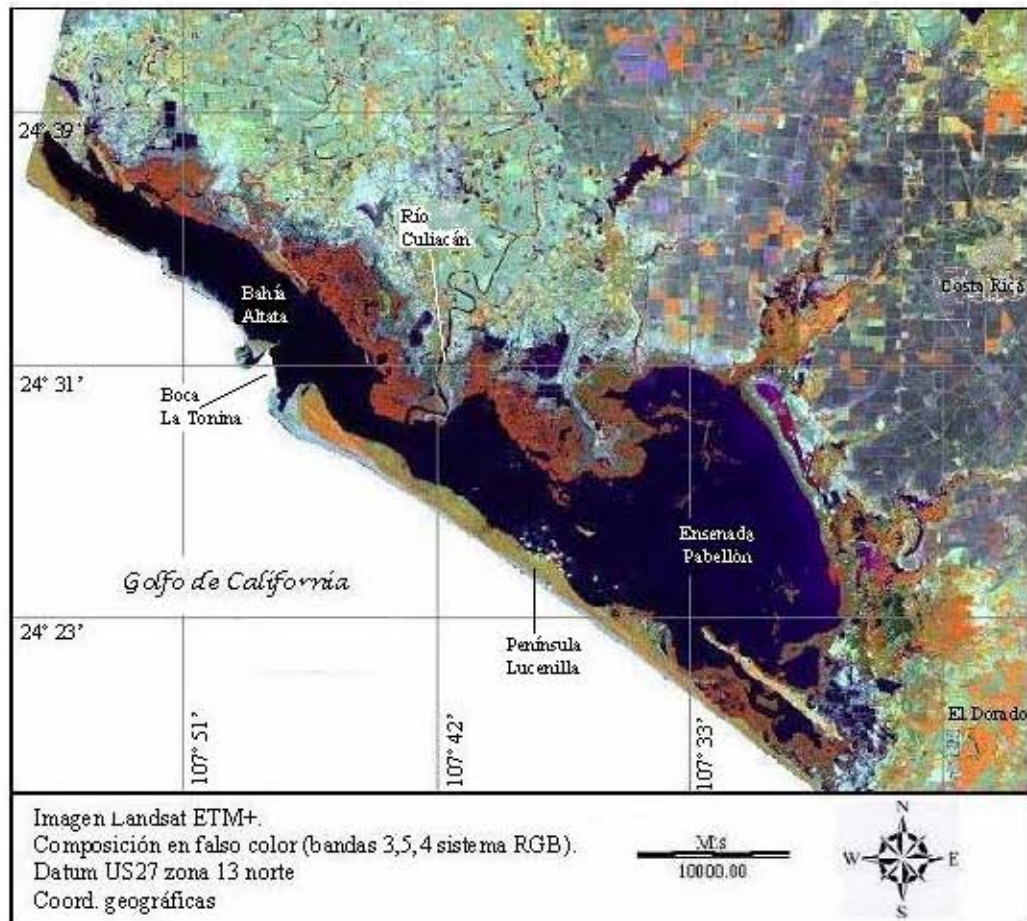


Fig. 5. Sistema lagunar Ensenada-Pabellones

El resto del sistema está cubierto por el complejo Ensenada-Pabellones (alrededor de 27,800 ha), sitio semicerrado por la Península de Lucenilla y en el que se ubican diversas islas y esteros (Contreras-Espinosa, 1993). La profundidad del sistema varía, aunque se estima un

promedio de 3 m. El sistema esta separado del mar por una barrera de arena de 60 km de largo y con 1 a 2 km de ancho, estando interrumpida por 2 entradas: una pequeña y relativamente reciente (La Palmita) y una principal La Tonina (Lieberknecht, 2000). La temperatura del agua varía de 20° C en enero a 32° C en agosto (INEGI, 2003). Lankford (1977) lo incluye en las categorías III-A y I-D cuyas características son la salinidad variable, la presencia de sedimentos terrígenos y con presencia de barrera tipo Gilbert de Beaumont. Son sistemas de boca de río con orientación paralela a la línea de la costa, con salida de agua continua o estacional y conformación de sublagunas de baja energía.

4.5. Sistema Ceuta

Ubicado al centro del estado, entre los 23°48' y 24°15' latitud norte y los 106°57' y 107°24' de longitud oeste (Fig. 6). Este estrecho sistema se encuentra semicerrado por la Península de Quevedo, aunque comunicado al golfo del lado suroeste por la boca del río San Lorenzo y en la porción sureste por un canal ancho, ambas aperturas son permanentes.

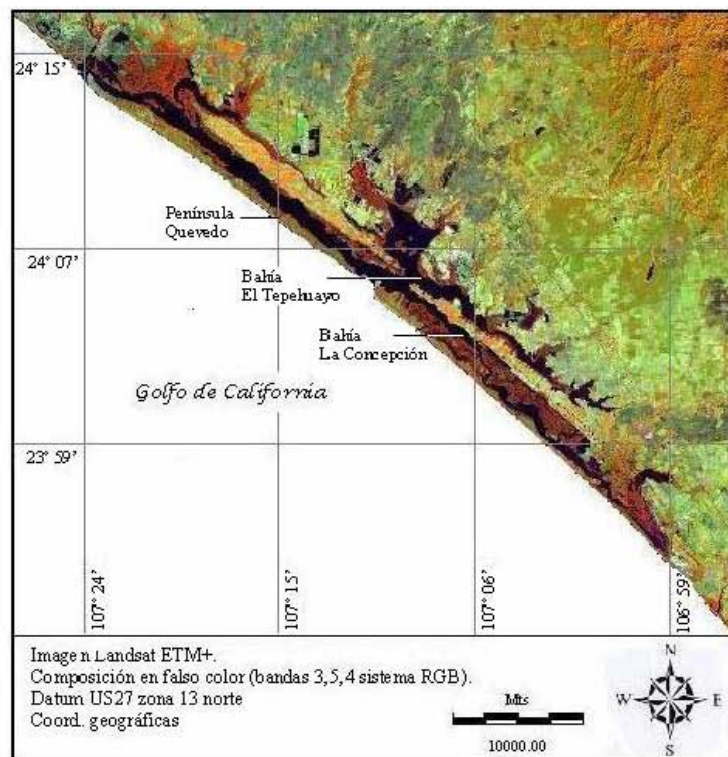


Fig. 6. Sistema Lagunar Ceuta

Está conformado por las bahías La Concepción, La Guadalupana y El Tepehuayo (Contreras-Espinosa, 1993; INEGI, 2003). La parte oriental de la laguna no recibe aportes significativos de agua dulce después de la época de lluvias (agosto-octubre), lo que aunado a su profundidad, la longitud y la radiación solar origina una alta tasa de evaporación. Su extensión aproximada es de 714 ha y está clasificado por Lankford (1977) del tipo III-A caracterizada por la presencia de barrera Gilbert de Beaumont, con baja energía, salinidad variable, presencia de sedimentos terrígenos y orientación paralela a la línea de la costa (Contreras-Espinosa, 1993).

4.6. Sistema Urías

Es el menor de los sistemas lagunares, con una extensión aproximada de 17 km. Se ubica al sur de la ciudad de Mazatlán y al norte de la desembocadura del río Presidio, entre los 23°09' y 23°12' de latitud norte y entre los 106°20' y 106°25' de longitud oeste (Fig. 7).

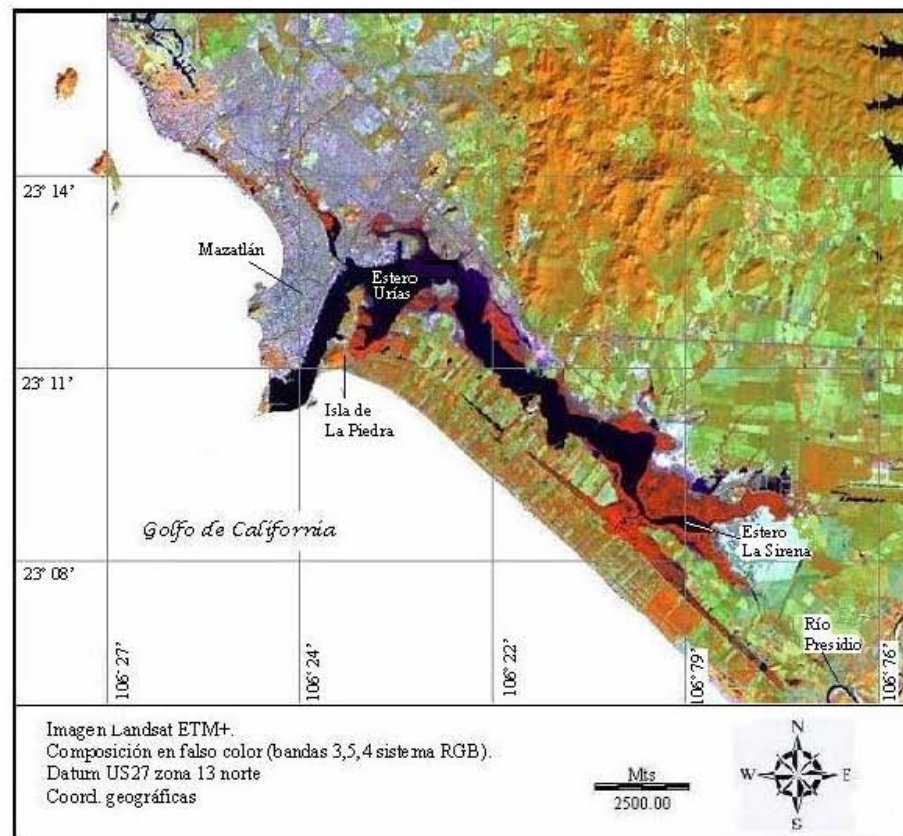


Fig. 7. Sistema lagunar Urías

Se considera un complejo lagunar conformado por los esteros del Astillero, Urías, Infiernillo, Pichichines y la Sirena. La profundidad máxima del canal principal es de 15 m. El drenaje está asociado a desechos urbanos de la ciudad de Mazatlán a donde se conecta a través del arroyo Jabalíes que desemboca al estero el Infiernillo y este a su vez al estero el Astillero. También existe drenaje asociado con actividades que vierten directamente sus aguas, como es el caso de la termoeléctrica y el rastro municipal (Contreras-Espinosa, 1993). De acuerdo a la clasificación de Lankford (1977) este sistema es de tipo IIIA Y IIIB presentando una orientación paralela a la línea de la costa, con salida al mar ausente o muy localizada, salinidad variable, baja energía y presencia de sedimentos terrígenos. Presenta además una barrera tipo Gilbert de Beaumont.

4.7. Sistema Huizache-Caimanero

Ubicado en la porción sur del estado, entre los paralelos 22°50' y 23°05' y entre los meridianos 105°55' y 106°15' (Fig. 8). Los ríos Presidio y Baluarte forman parte del complejo, los cuales comunican por medio de canales a dos esteros de la zona. La laguna presenta un área superficial de 17,100 ha, su temperatura varía entre los 23°C y los 33.8°C como máxima. La pesca y camaronicultura son actividades dominantes, aunque también se realizan actividades agrícolas (Garay-Morán, 2002). Lankford (1977) la clasifica como tipo III-A describiéndola como una laguna con orientación paralela a la línea de la costa con múltiples barreras de arena separadas por canales y salida de agua ausente, con salinidad variable y presencia de sedimentos terrígenos.

4.8. Sistema Teacapán- Agua Grande

La zona ubicada mas al sur del estado, se encuentra incluida en el sistema Teacapán-Agua Brava, el cual se encuentra en la planicie costera del norte de Nayarit y parte del sur de Sinaloa, entre los 22°47' y 22°25' de latitud norte y 105°35' y 105°47' de longitud oeste (Fig. 9). Presenta una extensión de 40,000 ha y según Lankford (1977) este complejo lagunar se clasifica en el tipo III-C. Se comunica al mar por la Boca Teacapán, con un ancho de 1000 m aproximadamente y con profundidades de 3 a 9 m de acuerdo con la época del año. Otra comunicación con el mar, aunque menos directa es a través del estero de Cuautla, que se

comunica al canal artificial que conecta el mar de Cortés con la denominada Boca de Cuautla. La precipitación es de 1459 mm año⁻¹ (INEGI 2003).

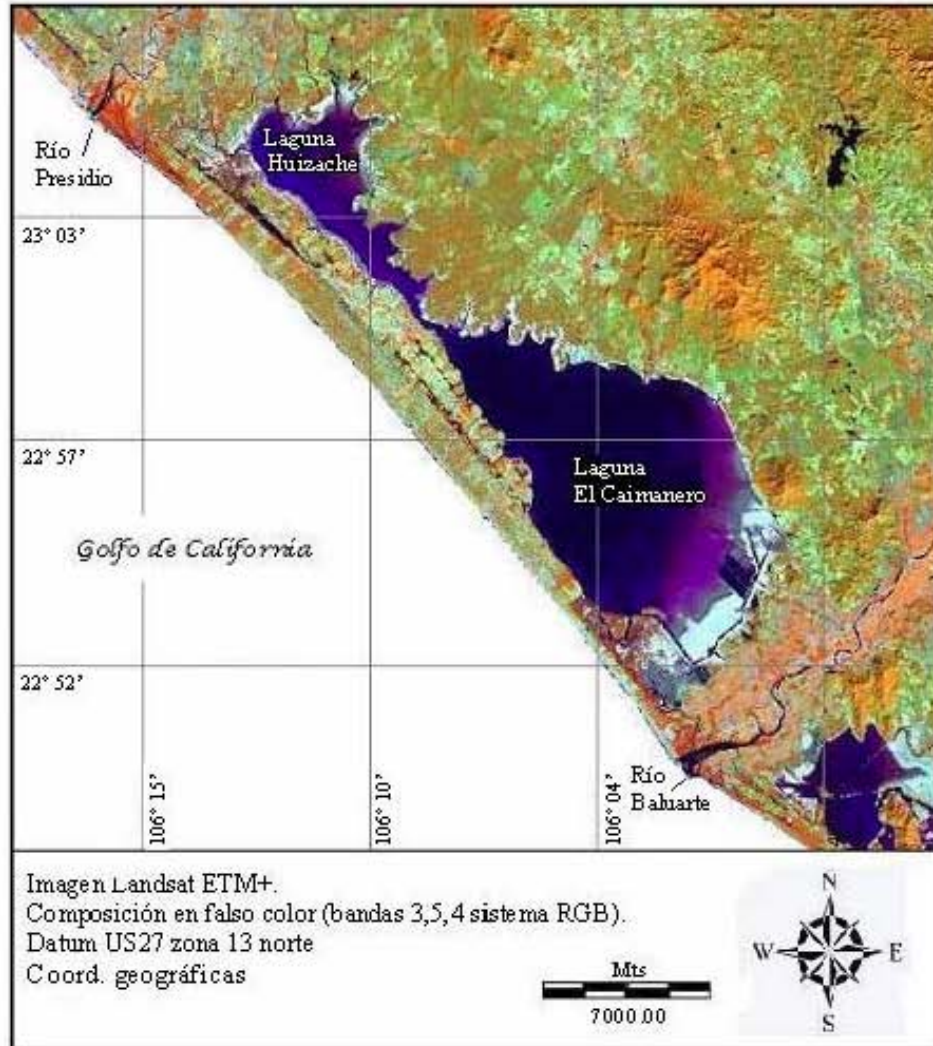


Fig. 8. Sistema lagunar Huizache-Caimanero



Fig. 9. Sistema lagunar Teacapán-Agua Grande

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con los objetivos propuestos, se procedió a la clasificación de imágenes del satélite Landsat de fechas recientes (2000-2003), así como de imágenes con fecha de 1973. De manera paralela se efectuó trabajo de campo con el fin de obtener datos para la validación de las clasificaciones más recientes, así como para la obtención de datos de estructura forestal de manglar en algunos sistemas estuarinos, para finalmente integrar la información, a fin de caracterizar los sistemas de manglar de Sinaloa de acuerdo a los métodos que se proponen a continuación.

5.1. Análisis de imágenes

5.1.1. Procesamiento de las imágenes

Para evaluar la distribución y extensión de los sistemas de manglar de Sinaloa se realizó el análisis digital de imágenes del satélite Landsat MSS que fueron registradas desde principios de la década de 1970 y de Landsat ETM+ de fechas recientes (2000, 2001 y 2003). El procesamiento de las imágenes que conforman este estudio (seis MSS y seis ETM+) se llevó a cabo con el programa de cómputo IDRISI Kilimanjaro, elaborando mapas temáticos a través de clasificaciones supervisadas y no supervisadas. Las imágenes ya se encontraban corregidas geométricamente por lo que no se realizó dicho proceso. Fueron proyectadas al sistema Universal Transverso de Mercator (UTM), utilizando el datum NAD27, con un tamaño de píxel de 30 x 30 m para las escenas ETM+ y un tamaño de 60 x 60 para las imágenes MSS correspondientes al año 1973. Es importante mencionar que si bien la resolución original de las imágenes MSS es de 80m, las empleadas en el presente estudio fueron proporcionadas por el programa North American Landscape Characterization (NALC), que seleccionó esta resolución y realizó la corrección geométrica para hacer compatibles estas imágenes con la resolución actual de Landsat.

Las imágenes MSS capturan la información en cuatro bandas del espectro electromagnético: banda 1 correspondiente al verde (0.5-0.6 μm), banda 2 correspondiente al rojo (0.6-0.7 μm), y dos bandas (3 y 4) del infrarrojo cercano (0.7-0.8 y 0.8-1.1 μm ,

respectivamente). Cabe mencionarse que estas bandas originalmente se designaban con la numeración del 4 a 7, misma que fue modificada (1 a 4) a partir del lanzamiento del satélite Landsat 4. Por asociación con esta última numeración, que es compatible con la de Landsat ETM+, en este estudio se decidió asignar la numeración de 1 al 4 en las imágenes MSS.

Las imágenes ETM+ cuentan con una mayor resolución espectral, dispuesta en 7 bandas, correspondientes al azul, verde y rojo del espectro visible (banda 1 (0.45-0.52 μm), 2 (0.52-0.60 μm) y 3 (0.63-0.69 μm)), una banda del infrarrojo cercano, 4 (0.76-0.90 μm), dos del infrarrojo medio, bandas 5 y 7 (1.55-1.75 y 2.08-2.35 μm , respectivamente) y una banda asignada al infrarrojo lejano o térmico, banda 6 (10.4-12.5 μm). Esta última banda no fue utilizada para el análisis.

Las principales características de las imágenes analizadas se muestran en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Principales características de las imágenes de satélite Landsat MSS correspondientes a la zona costera del estado de Sinaloa.

Año	1973					
Path/Row	34/42	32/43	33/42	33/43	32/44	31/44
Plataforma	Landsat 1					
Sensor	MSS					
Fecha de registro	13-may	10-jun	16-oct	23-sep	19-may	11-jul
Resolución	60 m					
Num. de bandas	4					
X mínima (UTM)	499500	193629	652980	620940	153387	290940
X máxima (UTM)	744060	424593	897540	865260	385167	534960
Y mínima (UTM)	2767140	2612082	2769480	2608260	2441088	2447880
Y máxima (UTM)	2998500	2831304	3000840	2839320	2672508	2678640

Con la finalidad de eliminar las zonas que no eran de interés para el estudio se hizo una selección del área generando sub-imágenes, acotando latitudinal y longitudinalmente la zona de estudio, recortando cada una de las bandas de las escenas originales. Para mejorar la interpretación visual de la información contenida en cada una de las imágenes, se efectuó el realce de las imágenes por medio de la técnica de estiramiento (*stretch* lineal) del programa Idrisi, logrando de esta forma mejorar el contraste en cada una de las bandas, redistribuyendo

los valores de reflectancia del intervalo en que se encontraban originalmente y optimizando las características visuales de la imagen (Eastman, 1995).

Cuadro 2. Principales características de las imágenes de satélite Landsat ETM+ correspondientes a la zona costera del estado de Sinaloa.

Año	2000				2001	2003
Path/Row	33/42	33/43	32/44	31/44	32/43	34/42
Plataforma	Landsat 7					
Sensor	ETM					
Fecha de registro	07-may	10-may	15-jul	21-dic	17-may	31-jul
Resolución	30 m					
Número de bandas	7					
X mínima (UTM)	662984.81	624464.94	139600.52	290828.25	168278.25	501712.85
X máxima (UTM)	897284.81	868094.94	379120.52	535130.25	416427.75	784342.85
Y mínima (UTM)	2773367.3	2823506.9	2664344.8	2447850.8	2606282.3	2734702.9
Y máxima (UTM)	2982077.3	2617991.9	2450594.8	2665505.8	2827043.3	2981542.9

Una vez obtenido el realce de las bandas, se elaboraron imágenes compuestas en falso color (donde la imagen resultante no corresponde al color verdadero), combinando las bandas 1, 2 y 3 para las escenas de 1973 y las bandas 3, 5 y 4 para las imágenes ETM+, asignándoles los colores rojo, verde y azul respectivamente (modo RGB) con la finalidad de representar con mejor calidad visible las variables a estudiar. Posteriormente, empleando las imágenes en falso color, se realizó la eliminación o enmascaramiento de áreas no incluidas en el estudio, excluyendo la superficie oceánica y la terrestre que no están relacionadas con el área de estudio, cubriendo de esta manera las zonas de escasa utilidad para el análisis (ver diagrama, figura 10).

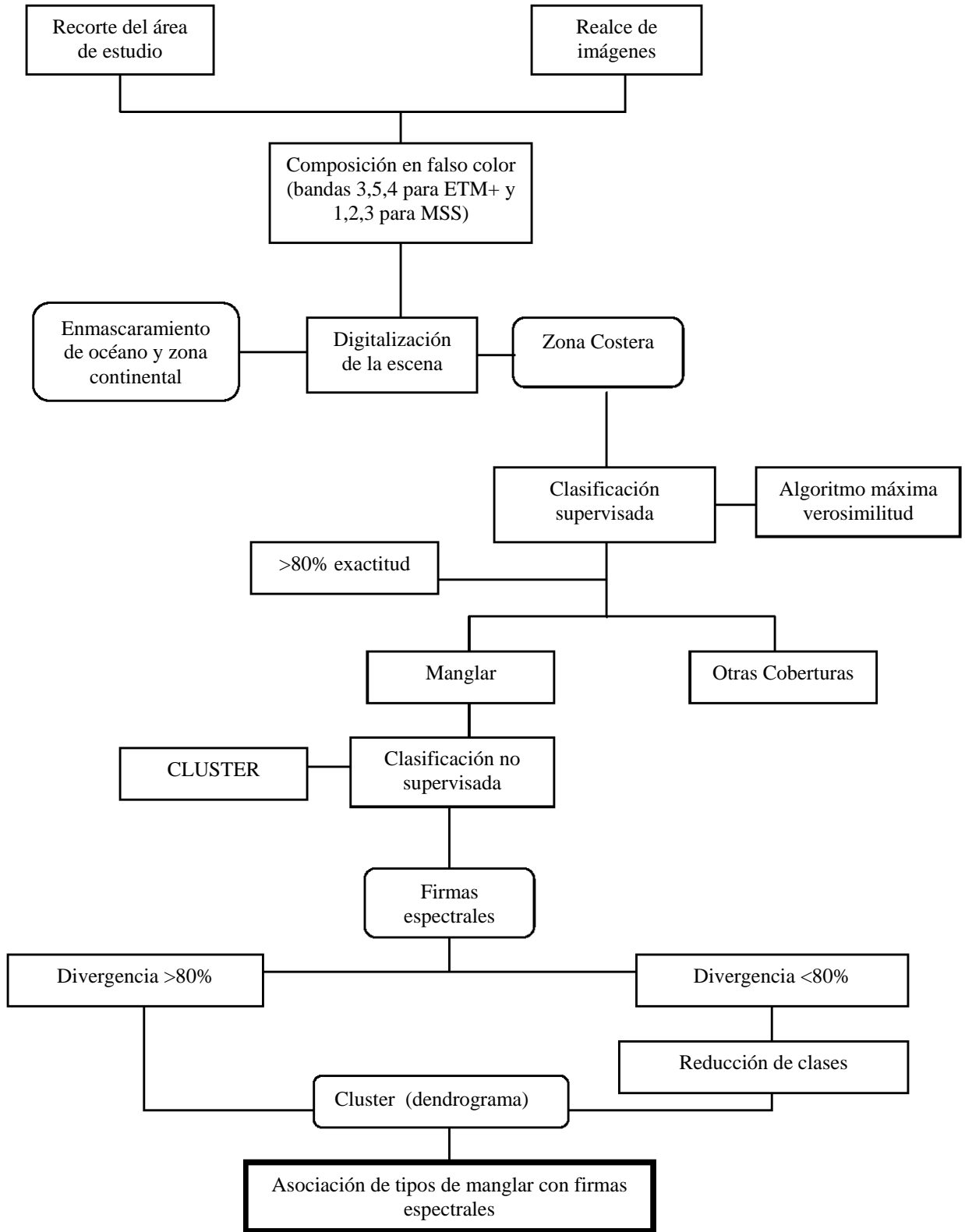


Fig. 10. Diagrama de flujo para la obtención de las firmas espectrales y su relación con la estructura forestal del manglar.

5.2. Clasificación de imágenes: Evaluación de la exactitud y estimación de la cobertura de manglar

Para la estimación de la cobertura de manglar se siguió una serie de métodos multivariados de clasificación, con algoritmos desarrollados para sistemas de cómputo por medio de los cuales los píxeles son agrupados y etiquetados con base en la similitud de sus características espectrales. Se realizaron los dos tipos de clasificación: la supervisada y la no supervisada.

Para llevar a cabo la clasificación supervisada se seleccionan en pantalla, por digitalización directa, campos de entrenamiento sobre las áreas que el usuario conoce y que identifican las clases de cubierta o terreno que interesan, en este caso, la zona de manglar. A partir de la obtención de los campos de entrenamiento, se genera la firma espectral, que es la forma peculiar de reflejar o emitir energía a partir de un determinado objeto o cubierta con características físicas o químicas específicas, que interactúan con la energía electromagnética y cuya respuesta varía de acuerdo a la longitud de onda. Las firmas espectrales son la base para discriminar una cubierta de otra (Chuvieco, 1996).

Teniendo como base la firma espectral generada a partir de los campos de entrenamiento, se clasifica la escena completa a través del examen de los valores de reflectancia, utilizando un algoritmo de agregación que permite asignar una clase a cada píxel. Para este estudio fue utilizado el algoritmo de máxima verosimilitud, que separa las clases con base en una función de densidad de probabilidad, asociada a la firma correspondiente a un campo de entrenamiento en particular. Los píxeles se asignan a la clase donde la probabilidad de pertenencia es mayor, dada la información específica de las firmas consideradas, A diferencia de otros métodos como el del paralelepípedo o de mínimas distancias, el algoritmo de máxima verosimilitud no solo considera los valores promedio, sino también la variabilidad de los valores de brillantez en cada clase (Campbell, 1996). Con la aplicación de este método se obtuvo la cobertura total de manglar, como categoría única.

Por otra parte, la clasificación no supervisada permite definir las clases espectrales presentes en la imagen asumiendo que los colores de cada píxel forman una agrupación o conglomerado (cluster) en la que cada píxel es comparado con el resto de los píxeles usando la distancia euclidiana (Chuvieco, 1996). Esta técnica se utilizó una vez que el manglar había

sido aislado de otras categorías y permitió definir clases de manglar dentro de la categoría general.

Aunque el procedimiento se siguió tanto para las imágenes recientes como para las de fechas anteriores, la validación de la clasificación con apoyo de datos de campo solo fue posible para las fechas más recientes. En términos generales, una vez obtenida la clasificación de las imágenes, se procedió a realizar la validación con los datos de campo obtenidos con ayuda de sistemas de posicionamiento global (GPS marca Garmin, modelo rino 120) con precisión aproximada de 15 m, de acuerdo a las especificaciones de los productores. El procedimiento para el registro de puntos de control se señala más adelante. Se evaluó la exactitud de los mapas generados por medio de diversos indicadores (matriz de error, exactitud global e índice de Kappa) los cuales se describen a continuación.

La matriz de error es un arreglo simétrico de los datos en columnas y renglones que expresan el número de unidades de muestra (píxeles) asignados a una categoría particular en una clasificación con relación al número de muestras asignados a una categoría similar de otra clasificación, donde una de ellas es considerada correcta (datos de referencia) mientras que la otra es generada con los datos de percepción remota. La matriz de error es una forma efectiva de obtener la exactitud de los mapas generados, donde las exactitudes de cada categoría describen de manera clara los errores de omisión y comisión presentes en la clasificación. Un error de omisión es aquel que resulta al ser excluido un dato cuando realmente pertenece a un grupo o categoría, mientras que el error de comisión puede ser definido como aquel que incluye un dato dentro de una categoría a la que no pertenece.

Dicha matriz permite obtener además la exactitud de usuario y productor, que representan la exactitud obtenida para cada categoría individual. La exactitud global se obtiene como resultado de dividir la suma de los valores de la diagonal principal, es decir, los datos correctamente clasificados, entre el total de unidades de la matriz (Congalton y Green, 1999).

Otra técnica de evaluación de la exactitud de la clasificación es la estimación del valor del índice de Kappa ($\hat{\kappa}$), que consiste en una técnica multivariada aplicada para determinar de manera estadística la exactitud obtenida a partir de los datos generados por la matriz de error.

Un estimado de este índice ($\hat{\kappa}$) toma valores que van de cero a uno, donde mientras más

próximo a 1.0 sea el valor resultante, mejor será la clasificación obtenida con relación a una generada al azar (H_0). La exactitud de la clasificación obtenida con \hat{K} fue evaluada con el estadístico Z , el cual consiste en una prueba de hipótesis ($H_0: K_1 = 0$ y $H_1: K_1 \neq 0$) que rechaza la hipótesis nula cuando $Z \geq Z_{\alpha/2}$, donde $\alpha/2$ es el nivel de significancia en una prueba Z de dos extremos, cuando los grados de libertad son asumidos como infinito (Colgalton y Green, 1999). Para considerar como aceptable la clasificación se tomó como mínimo el 80% en la exactitud global.

Clasificación	Datos de referencia				total renglones n_{i+}
	j=columnas	1	2	k	
	1	n_{11}	n_{12}	n_{1k}	n_{1+}
	2	n_{21}	n_{22}	n_{2k}	n_{2+}
i = renglones	k	n_{k1}	n_{k2}	n_{kk}	n_{k+}
Total de columna n_{+j}		n_{+1}	n_{+2}	n_{+k}	N

Si P es el número total de unidades de muestreo (puntos o campos de prueba) de la matriz de error y si:

x_{ii} es el valor de la clase i en el renglón i y representan unidades de muestreo correctamente clasificadas.

x_{jj} es el valor de la clase j en la columna j y representa unidades de muestreo correctamente clasificadas (diagonal de la matriz).

$$x_{i+} = \sum x_{ij} \text{ (sumatoria de todos los valores de las columnas en el renglón } i\text{), y}$$

$$x_{+j} = \sum x_{ij} \text{ (sumatoria de todos los valores de los renglones en la columna } j\text{),}$$

entonces:

$$\text{exactitud del productor} = x_{jj}/x_{+j}$$

$$\text{exactitud del usuario} = x_{ii}/x_{i+}$$

$$\text{exactitud total} = \sum_j x_{ii}/P$$

y el estimador del coeficiente de Kappa (\hat{K}) es definido por:

$$\hat{K} = \frac{P \sum_i x_{ii} - \sum_j x_i + x + j}{P^2 - \sum_j x_i + x + j}$$

Con base en las estimaciones resultantes, se consideró un nivel mínimo de 80% de exactitud para considerar como aceptable la clasificación (Congalton y Green, 1999). Por lo anterior, se procedió a realizar una técnica de clasificación híbrida de acuerdo a lo especificado anteriormente, donde inicialmente se clasificó al manglar como cobertura general por medio de la clasificación supervisada y habiendo obtenido una exactitud superior a 80%, se inició el proceso de clasificación por el método no supervisado a fin de separar los diferentes grupos espectrales presentes en la cobertura clasificada como manglar (Chuvieco y Congalton, 1988).

Inicialmente se usó la imagen resultante de la clasificación supervisada de manglar como máscara para eliminar toda la información no relacionada con la cobertura de manglar. El proceso se aplicó a cada una de las bandas y posteriormente se llevó a cabo una clasificación no supervisada para separar los distintos grupos con afinidad espectral. Las firmas espectrales resultantes fueron analizadas para depurar la información redundante, eliminando del análisis a los grupos para los que se evidenció ausencia de vegetación y agregando en grupos homogéneos las clases con firmas similares. Este procedimiento se realizó utilizando la medida de divergencia transformada, la cual parte de la base de que los valores digitales en una categoría se distribuyen normalmente, considerando la separabilidad como medida del solapamiento entre categorías vecinas. Un valor del 100% indica una excelente separación de clases, mientras que menos del 80% indica una pobre separación entre las clases (Jensen, 1996). Para el presente estudio se consideraron como clases independientes aquellas que presentaron al menos 80% de similitud.

Una vez agrupadas las firmas de acuerdo a lo anterior, el número total de clases espectrales obtenidas se redujo a 4 para cada escena, donde cada clase presentaba características espectrales específicas correspondientes a grupos morfológicos de manglar, con diferencias en estructura y densidad.

Las clases se definieron en función de la respuesta espectral en el conjunto de las bandas (firma espectral), siguiendo los lineamientos descritos por Chuvieco (1996). Este autor señala que el comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectancia en las bandas visibles con un máximo relativo en la porción verde del espectro y mínimo en rojo, mientras que en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectancia para posteriormente reducirse de manera paulatina hacia el infrarrojo medio.

Existen diferencias para el caso de los sensores de Landsat MSS y TM o ETM+, debido a su diferente resolución espectral, aunque el principio seguido es el mismo, pudiendo interpretarse las lecturas de acuerdo a las siguientes características:

La banda correspondiente al verde (B1 en MSS y B2 en TM) permite clasificar la vegetación en relación a su vigor. Mientras mayor sea la respuesta, mayor vigor.

La banda correspondiente al rojo (B2 en MSS y B3 en TM) responde a la concentración de clorofila, la cual es absorbida por esta región del espectro y por lo que los valores menores se relacionan a altas concentraciones de clorofila.

El infrarrojo cercano (B3 y B4 en MSS y B4 en TM) se asocia con alta reflectancia a la pared celular vegetal, por lo que se relaciona con vigor y contenido de biomasa.

El infrarrojo medio (B5 y B7 en TM, no existe en MSS) es indicativo del contenido de humedad.

De acuerdo con lo anterior, en la figura 11 se presentan dos firmas espectrales típicas para Landsat MSS y TM, que corresponden a vegetación vigorosa.

En función de lo anterior, se definieron cuatro tipos de manglar que fueron determinados únicamente para las imágenes TM. Se asignó el Tipo 1 a la vegetación asociada a píxeles con el menor valor en el canal Rojo y el valor más elevado en el IR cercano, correspondiendo ambas condiciones a vegetación con una fuerte concentración de clorofila y elevada biomasa. La información fue reforzada al incluirse en el análisis a la banda 5, correspondiente al infrarrojo medio, que es indicador de humedad, en este caso de suelos con alto contenido de agua. Siguiendo ese criterio, el Tipo 4 representa a la vegetación más dispersa, con escasa biomasa y asociada a suelos secos o con menor grado de humedad.

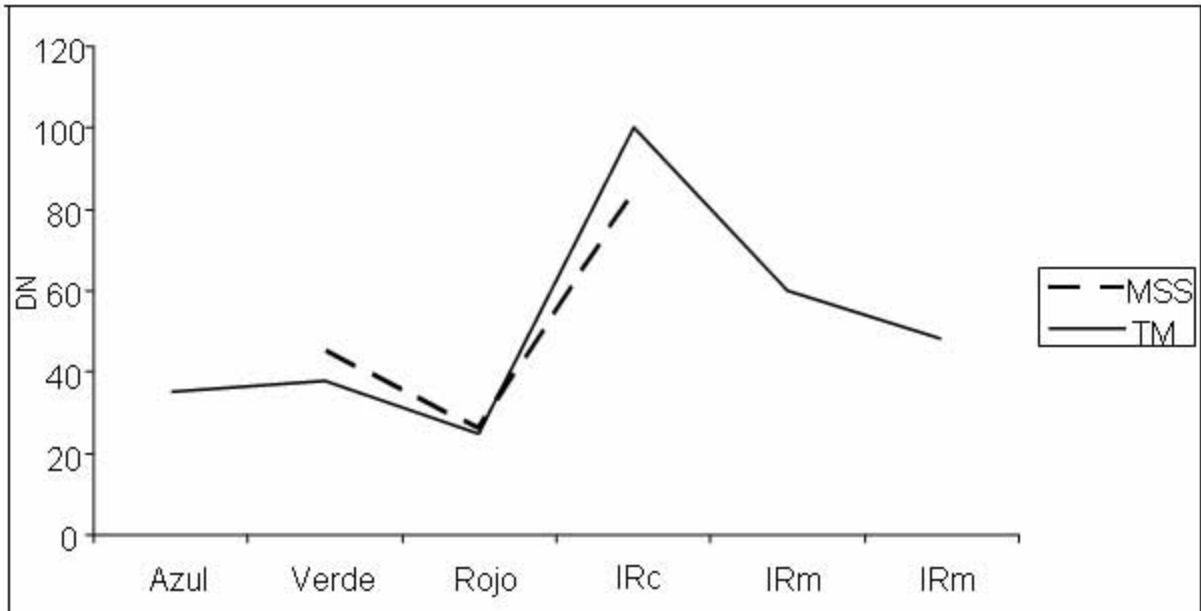


Fig.11. Firmas espectrales típicas para coberturas vegetales con alta biomasa y vigor vegetal, obtenidas del análisis digital de imágenes Landsat MSS y TM. La resolución espectral varía en los diferentes canales o bandas de ambos sensores. IRc. Infrarrojo cercano (MSS tiene dos); IRm. Infrarrojo medio (ETM+tiene dos). DN= Numero digital.

Los cuatro tipos de manglar quedaron definidos como sigue, estando presentes en todas las imágenes clasificadas, aunque los valores espectrales promedio, obtenidos en cada imagen no necesariamente son similares:

- Tipo 1. Concentración alta de clorofila y biomasa elevada
- Tipo 2. Concentración media de clorofila y biomasa elevada
- Tipo 3. Concentración media de clorofila y biomasa baja
- Tipo 4. Concentración baja de clorofila y biomasa baja

Con los resultados de la clasificación, tanto a nivel de categoría general, como por clase o tipo de manglar, se obtuvo la extensión ocupada en hectáreas (ha). Este procedimiento consiste en multiplicar el área que cubre un píxel y multiplicarlo por el número de píxeles de una clase determinada y se lleva a cabo de manera automática con ayuda del modulo “Area” del programa Idrisi, el cual verifica el número de píxeles por clase y en función de las necesidades del usuario, los resultados se presentan como número de celdas, o en unidades de área dentro

del Sistema Métrico Decimal o Inglés. Para el presente trabajo los resultados se presentan en hectáreas.

5.3. Determinación de la estructura forestal

Aunque en sentido estricto la estructura forestal involucra un mayor número de parámetros que permiten caracterizar los bosques o rodales, entendiéndola como la manera en que las plantas se encuentran dispuestas de acuerdo a sus características específicas (Valdéz-Hernández, com. pers.ⁱ), para el desarrollo del presente trabajo únicamente se consideraron cuatro descriptores: densidad, área basal, dominancia y frecuencia de las especies de mangle.

Dada la extensión de los manglares de Sinaloa, así como la diversidad de sistemas en los que se localizan, se realizaron visitas a localidades seleccionadas sobre los mapas temáticos generados por el proceso de clasificación. Este proceso permitió la evaluación de la estructura en algunos de los sistemas lagunares más importantes de Sinaloa para su posterior relación con la información espectral generada por el procedimiento de clasificación.

El estudio de la estructura del manglar se realizó siguiendo el método de Cuadrantes Centrados en un Punto (PCQM), diseñado por Cottam y Curtis (1956) y posteriormente modificado por Cintrón-Molero y Schaeffer-Novelli (1984). Este método sigue transectos a lo largo de una línea principal que cruza la localidad estudiada. Una vez que se define la dirección del transecto, se establece un primer punto de muestreo y con el apoyo de una cruceta o bien siguiendo la línea de muestreo que divide al terreno en dos partes, además del establecimiento de una línea imaginaria perpendicular a la dirección seguida por la línea principal, se generan cuatro cuadrantes. El origen de los cuadrantes se utiliza como referencia para la medición de las distancias a los árboles más próximos en cada cuadrante. Posteriormente se determina la circunferencia de cada individuo a una altura aproximada de 1.30 m para la posterior obtención del diámetro a la altura de pecho (DAP). Cabe mencionarse que únicamente se consideraban los árboles con DAP mayor o igual a 2.5 cm. Una vez registrada la distancia y el DAP, se anota la especie a la que corresponde el individuo medido.

Aunque se llevaron a cabo escasos muestreos en comunidades de mangle tipo matorral, la metodología a seguir fue la propuesta por Valdéz-Hernández (2002) que se fundamenta en

el establecimiento de unidades de 4x4 m (16 m²) y de 1x1 m (1 m²). En las unidades de 16 m² se registra la densidad de los tallos menores a 2.5 cm de DAP pero mayores a 1.3 m de altura y en las de 1 m² la abundancia de los tallos menores a 1.3 m pero mayores de 30 cm de altura para las especies de *L. racemosa* y *A. germinans*, mientras que para *R. mangle* se toman los individuos con alturas de entre 0.50 a 1.50 m de altura, con la finalidad de evitar una contabilidad errónea de los individuos ya que esta especie puede presentar propágulos de hasta 50 cm de tamaño.

A partir de los datos registrados en campo y de acuerdo a las ecuaciones presentadas por Stiling (1999) se obtuvo la siguiente información:

5.3.1. Área basal. El área basal indica el grado de desarrollo que presenta el bosque de manglar y puede ser relacionada con su biomasa y volumen. Debido a que este parámetro está directamente relacionado con el diámetro, se tomaron las mediciones de la circunferencia del tronco a la altura del pecho de los individuos con un diámetro mayor a 2.5 cm, es decir, mayores a 8 cm de circunferencia. Posteriormente se calculó el diámetro por medio de la fórmula $D = c/\pi$ a partir de la cual se obtuvo el radio ($r = D/2$) que fue utilizado para obtener el área basal con la expresión:

$$AB = \sum \pi * r^2$$

donde:

AB = Área basal de los individuos

$\pi = 3.1416$

r = radio de los individuos

5.3.1.1. Área basal por hectárea. Nos permite conocer el desarrollo del bosque en función al área que ocupa y se obtiene con la siguiente expresión:

$$ABh = \left(\sum ABi * Dai \right) * 1/10,000$$

donde:

ABh = Área basal por hectárea

$\sum AB_i$ = sumatoria del área basal de la especie i

D_{ai} = Densidad absoluta de la especie i

5.3.2. Densidad. Parámetro que determina la abundancia de una especie o una clase de plantas en relación al área que ocupan. La densidad (D) se estima como el número de individuos (N) en un área (A) determinada ($D = N/A$). La función anterior fue utilizada para evaluar la densidad en los cuadros de 1 m² y 16 m², extrapolándose posteriormente a hectáreas. Para el método de PCQM, se aplicó la siguiente función para estimar la densidad por hectárea.

$$D_h = 1000/d^2$$

donde:

D_h = densidad por hectárea

d = distancia promedio

5.3.3. Dominancia relativa: Representa la relación porcentual entre la suma de las áreas basales de una especie (Dominancia absoluta) con respecto a la suma de las áreas basales de cada especie encontrada en la línea de muestreo.

$$D_r = (AB_i / \sum AB) * 100$$

donde:

D_r = Dominancia relativa

AB_i = área basal de la especie i

$\sum AB$ = sumatoria del área basal de todas las especies

5.3.4. Índice de Valor de Importancia (IVI). Este índice propuesto por Curtis y McIntosh (1951) se utilizó como indicador de la estructura, ya que señala la relevancia que tiene cada especie dentro del bosque, en función de los parámetros anteriores y que se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

$$VI = Ar_i + Fr_i + Dr_i$$

donde:

Ar_i = Densidad relativa de la especie i

Fr_i = Frecuencia relativa de la especie i

Dr_i = Dominancia relativa de la especie i

Dado que el valor de las variables es expresado en porcentaje, el máximo valor que puede adquirir el IVI es de 300.

5.4. Relación estructura forestal – respuesta espectral

Para obtener la relación de la estructura forestal del manglar con las clasificaciones resultantes de los mapas generados, en cada uno de los sitios seleccionados para realizar los muestreos se registró la posición geográfica en unidades UTM, con apoyo de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) con precisión aproximada de 15 m.

El procedimiento anterior permitió además de ubicar la posición de los sitios donde se realizaron los transectos, contar con información de campo suficiente para llevar a cabo la evaluación de la exactitud de las clasificaciones de años recientes (2000-2003). Se realizó trabajo de campo en 7 de los 8 principales sistemas costeros del Estado, efectuándose 100 transectos y tomando un total de 591 puntos de control (Cuadro 3). En la mayoría de los casos se tuvo acceso a los sistemas por vía acuática a través del canal principal o de canales secundarios.

Cuadro 3. Sistemas costeros muestreados, número de transectos y puntos de control tomados por sistema.

Zona	Sistema	Transectos	Puntos de control
Norte	Ohuira-Topolobampo	33	94
	Navachiste	11	123
Centro	Altata-Ensenada Pabellones	17	97
	Santa María-La Reforma	17	181
	Ceuta	4	47
Sur	Urías	4	22
	Teacapán-Agua grande	14	27
	Total	100	591

Como se señaló anteriormente, los puntos de control permitieron la evaluación de la exactitud de la clasificación a nivel de categoría general (clase manglar), en tanto que la información correspondiente a los transectos se utilizó para contrastar los datos de estructura forestal con los resultados de la clasificación de los cuatro tipos de manglar separados espectralmente (Tipos 1-4).

La probable relación entre estructura y respuesta espectral, se evaluó desde dos puntos

de vista. En primer término, utilizando las propiedades de los SIG, se situaron los transectos sobre los mapas correspondientes a las clasificaciones de manglar. Una vez obtenidos los datos de estructura forestal de cada uno de los transectos realizados se incorporaron al SIG, en plataforma de ArcView, de manera que visualmente pudiera determinarse la posible concordancia entre las características estructurales evaluadas y la clasificación obtenida con las imágenes. Los valores de densidad y área basal, evaluados para la cobertura de manglar en su conjunto, fueron a su vez reclasificados en cuatro categorías, que se contrastaron visualmente con las clases de manglar dentro de las que se ubicó geográficamente el transecto. La proporción de coincidencias entre ambas clasificaciones fue utilizada como indicador de la relación entre la estructura y la respuesta espectral.

Por otra parte, considerando que se pretende extrapolar los resultados obtenidos a escala local a escala estatal, se utilizó un método multivariado de clasificación (cluster), que permitió agrupar a las localidades con afinidad. Para ello se consideró la información generada en cada una de las imágenes recientes (200-2003), con relación a los Tipos 1-4 de manglar. Para cada imagen se obtuvieron las firmas espectrales de los cuatro tipos de manglar clasificados, por lo que los valores promedio de brillantez obtenidos para cada una de las bandas (6) fueron consideradas como las variables (columnas) y las localidades con su correspondiente tipo de manglar (Tipos 1-4) en los renglones. De esta manera se generó una matriz de tamaño 6 (bandas) x 24 (localidad+tipo de manglar)

Con la matriz organizada de esta manera se aplicó un análisis de Cluster, utilizando la distancia euclidiana como medida de separación y el algoritmo UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean) como método de agregación. Los resultados se obtuvieron con la aplicación del programa Statistica y se presentan ajustados a una escala de 100, generándose los grupos cuando la distancia era superior a 70.

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de este procedimiento se intentó corroborar que existe afinidad entre las firmas correspondientes a tipos específicos de vegetación, lo que implicaría la existencia de homogeneidad en la información espectral, por lo que dependiendo de ello puede proponerse que los resultados son semejantes para todo el estado.

5.5. Estimación de cambios espaciales y temporales en la distribución de manglar

Con relación a la estimación de los cambios que ha sufrido la extensión del manglar desde 1973 hasta fechas recientes, se calculó el área de manglar para dichas fechas, analizando las imágenes Landsat MSS correspondientes, siguiendo procedimientos similares al detallado en el apartado de estimación de la cobertura de imágenes ETM+, con la diferencia de que no fue posible llevar a cabo un proceso de validación de los resultados semejante al de las imágenes recientes, por carecerse de información de campo o datos auxiliares confiables, que permitieran dicha evaluación. Considerando que el procedimiento es el mismo, se asume que el error generado en la clasificación de las imágenes MSS es similar al estimado para las imágenes recientes.

Una vez que se contó con la estimación de cobertura para ambas fechas, se obtuvo la diferencia en hectáreas, estimando además la proporción de incremento o reducción del área ocupada por los manglares, generada durante el periodo de tiempo que se incluye en el presente estudio. Para lo anterior se tomó como base la superficie evaluada para las imágenes de 1973.

Con la finalidad de comparar las escenas de ambas fechas y tomando en cuenta la diferencia de resolución que tienen, se procedió a efectuar una corrección geométrica para cambiar la resolución de las imágenes recientes por medio del comando “resample” de Idrisi, de manera que todas las escenas utilizadas para el estudio tuvieran la resolución de 60 m.

Una vez generadas las imágenes con la misma resolución, se procedió a una corrección geográfica final, que permitiera el registro exacto entre los seis pares de imágenes, contando con las mismas coordenadas extremas e igual número de columnas y renglones.

Finalizado el procedimiento anterior, el análisis comparativo de ambas imágenes se llevó a cabo por medio de un proceso de contraste de imágenes denominado “*crosstabulation*”, que forma parte de los módulos de análisis del programa Idrisi Kilimanjaro. Este procedimiento, similar al desarrollado para la matriz de error, genera una matriz que coloca en las columnas los valores de referencia, en este caso los datos generados en las escenas de 1973 y en los renglones sitúa los resultados obtenidos para fechas recientes. De esta manera es posible determinar la magnitud y dirección del cambio. Este método genera además los valores

de Kappa generales y para cada clase, con valores de 0 a 1, donde 0 indica un cambio total de la cobertura y 1 representa un cambio nulo entre las fechas analizadas.

5.6. Caracterización del estado actual del sistema de manglar en Sinaloa

Para la caracterización del estado del sistema de manglar, toda la información generada durante los diferentes procesos fue integrada en un SIG (ArcView 3.2). Considerando que todas las imágenes fueron georreferidas en el sistema UTM y que por la extensión y ubicación del estado de Sinaloa éste se ubica entre dos zonas UTM (12 y 13 norte) el proyecto del SIG incluye resultados para ambas zonas.

Para la caracterización final, se integran los resultados obtenidos a través de las imágenes y del trabajo de campo, tomando en cuenta la regionalización de los sistemas acuáticos del estado que se detalló en la sección de Área de estudio. Con estos elementos se realizó una descripción y evaluación general que permita sintetizar la información, con un análisis final sobre el estado actual que guardan los manglares de Sinaloa, tanto en cobertura o extensión, como en relación a los cuerpos de agua o sistemas acuáticos de los que dependen, así como los aspectos evaluados de estructura forestal y su relación con la información derivada de las imágenes de satélite.

6. RESULTADOS

6.1. Estimación de la cobertura de manglar y evaluación de la exactitud de la clasificación

Una vez que se llevó a cabo el procesamiento de las seis imágenes ETM+, para corregir geográfica y geoméricamente las escenas y delimitar las zonas para la clasificación, se obtuvo una estimación final de la exactitud global de la clasificación de 91%, a partir de 591 puntos de control (Cuadro 4).

Cuadro 4. Matriz de error de la clasificación para fechas recientes (2000-2003), con 591 puntos de control.

Clasificación	Clase	Datos de referencia			Exactitud de usuario %
		Manglar	Otros	Total columnas	
	Manglar	275	28	303	90.8
	Otros	24	264	288	91.7
	Total renglones	299	292	591	
	Exactitud del productor %	92.0	90.4		91.2

El estimado para el coeficiente de Kappa dio un valor de 0.89, mientras que el estadístico Z obtuvo un valor de 0.08 con lo que se puede decir que la clasificación generada por métodos supervisados es significativamente mejor que una clasificación generada al azar ($P > 0.05$, rechazando la hipótesis nula). Con de los mismo datos, fue posible determinar que tanto la exactitud del usuario como la del productor obtuvieron valores fueron superiores al 90% en ambos casos.

Considerando que los coeficientes de exactitud corresponden a una clasificación con concordancia elevada entre los datos de referencia y los resultantes de la clasificación, se asumió que los mapas temáticos generados representan adecuadamente la distribución de manglar en Sinaloa, por lo que se procedió a la estimación de su extensión.

Como cobertura general, se estimó que en fechas recientes el manglar de Sinaloa ocupa aproximadamente 62,000 ha, de las cuales más del 80% se ubican en los sistemas lagunares estuarinos localizados en la zona norte y centro del estado. Los valores de cobertura por sistema se situaron entre 870 a cerca de 16,000 hectáreas. Los sistemas denominados Ohuira-Topolobampo y Santa María-La Reforma registraron las mayores extensiones, seguidos por Navachiste y Teacapán-Agua Grande todos ellos con valores cercanos o superiores a las 10,000 hectáreas de manglar, mientras que Urías y Huizache-Caimanero fueron los sitios con la más baja presencia de manglar (menores a las 900 ha) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Cobertura de manglar expresada en hectáreas registrada para fechas recientes (2000-2003) por sistema lagunar.

Sistema	Hectáreas
Ohuira-Topolobampo	10,795
Navachiste	10,365
Santa María-La Reforma	15,947
Altata-Ensenada Pabellones	7,644
Ceuta	5,547
Urías	876
Huizache-Caimanero	874
Teacapán-Agua Grande	9,375
Total	61,955

Una vez que se aisló al manglar como cobertura única en cada una de las bandas de las seis imágenes, se efectuaron las clasificaciones no supervisadas, generándose un número variable de clases con sus respectivas firmas espectrales (25 a 74 clases). En todos los casos se efectuó una reclasificación, utilizando tanto el criterio del clasificador, como la técnica de separación de firmas, detallada en la sección de Métodos, aplicando el procedimiento de Divergencia transformada para reducir a cuatro el número de clases. Estas clases representan diferentes estados de vigor vegetal y de biomasa, la cuales se representan de forma esquemática en la Figura 12.

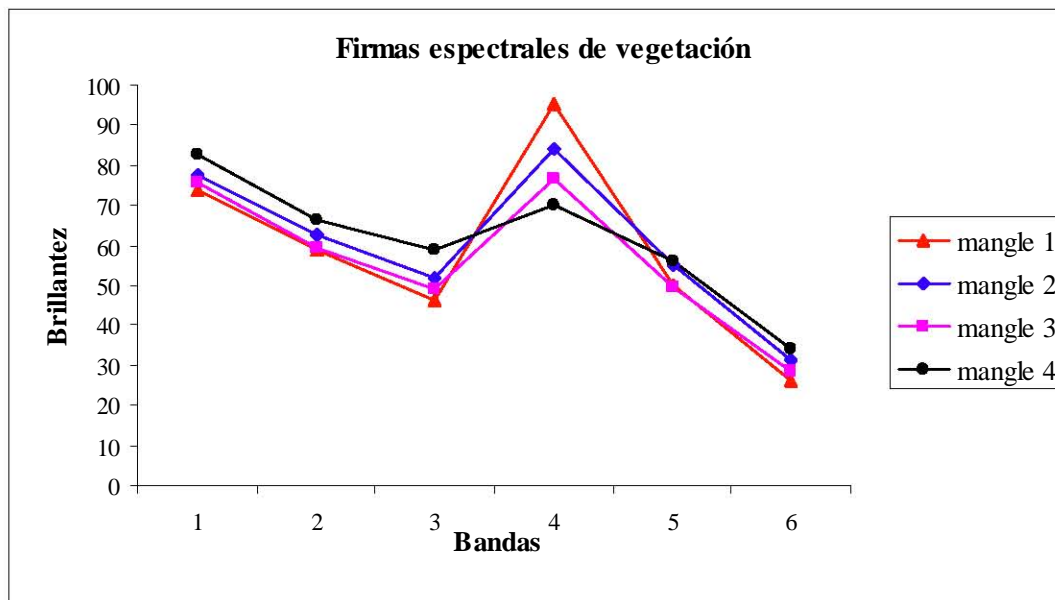


Fig. 12. Firmas espectrales características de tipos de manglar en imágenes ETM+

Los resultados para cada uno de los sistemas analizados en términos del área estimada para cada uno de los tipos de manglar, se presentan en el Cuadro 6. De igual manera se presenta la distribución de los diferentes tipos de manglar en los principales sistemas lagunares de Sinaloa, donde es posible apreciar que no existe una distribución homogénea a lo largo del estado (Fig. 13).

Cuadro 6. Extensión de tipos de manglar, por sistema lagunar en Sinaloa

Sistema	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Total
Ohuira-Topolobampo	2328	8788	4859	830	10795
Navachiste	2615	5070	1671	1009	10365
Santa María-La Reforma	9165	4637	1734	411	15947
Altata-Ensenada Pabellones	3078	2040	1992	532	7644
Ceuta	610	2750	1595	593	5547
Urías	413	248	59	156	876
Huizache-Caimanero	409	316	296	53	874
Teacapán-Agua Grande	648	2310	2054	4363	9375
TOTAL	19266	26159	14260	7947	61423

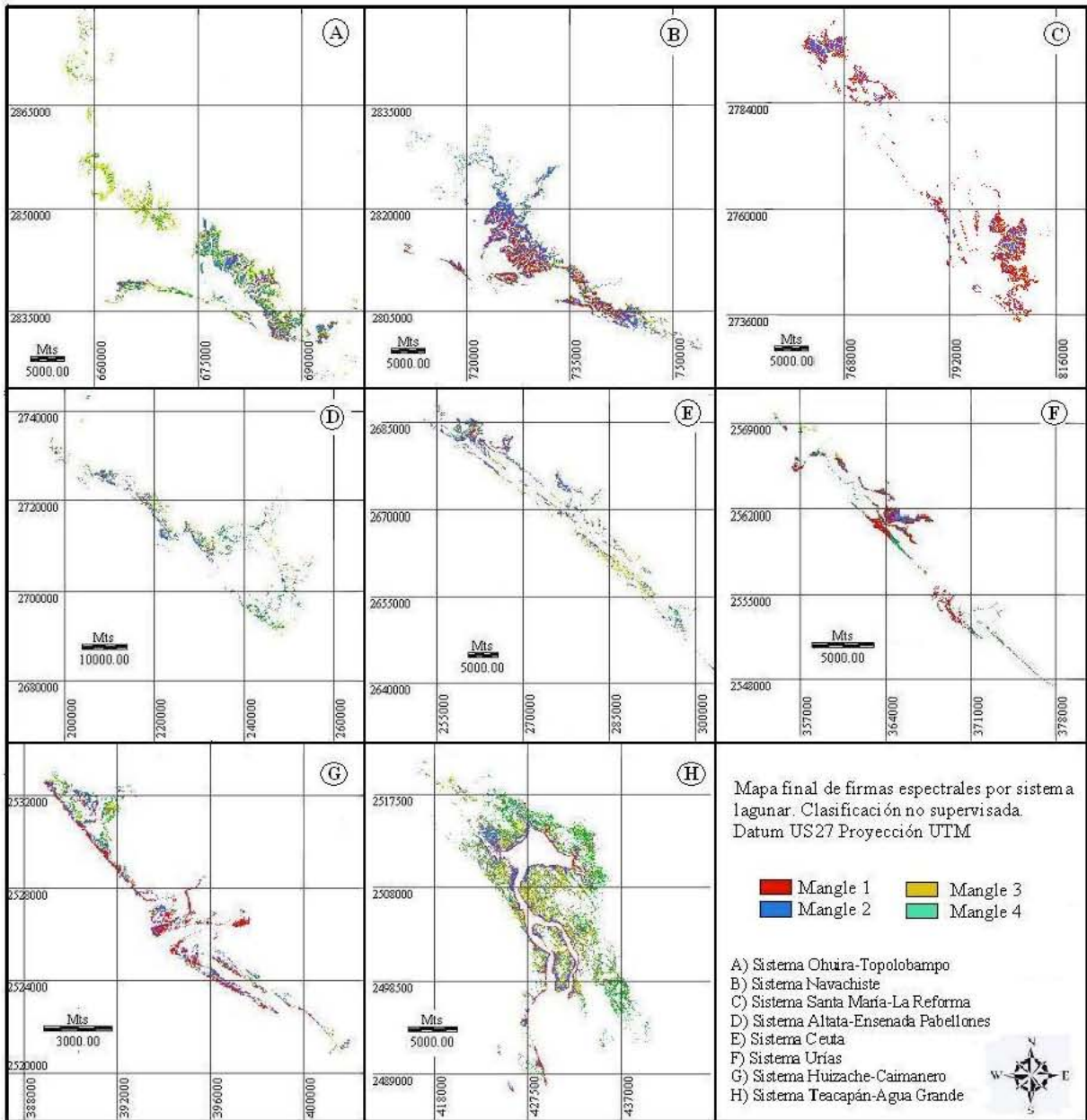


Fig. 13. Distribución de tipos de manglar en sistemas lagunares de Sinaloa, de acuerdo a su firma espectral

6.2. Determinación de la estructura forestal

Por lo que corresponde a la estructura forestal evaluada de manera local, durante los 20 muestreos realizados en campo, se efectuó un total de 100 transectos de acuerdo a lo indicado

en la sección de métodos. La mayor parte de los mismos se efectuó en la zona norte del estado, donde se ubica la mayor cobertura y densidad de manglar. Los datos obtenidos en cada transecto se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Localización, número de transectos (Tn) y valores de los principales parámetros de estructura forestal en sistemas lagunares de Sinaloa. AB. Área basal.

Sitio	Tn	Dominancia relativa %				AB total (m ² ha ⁻¹)	AB por especie (m ² ha ⁻¹)				Densidad total fustes ha ⁻¹
		Ag	Rm	Lr	Ce		Ag	Rm	Lr	Ce	
El Colorado	T1		100			42		42			9234
	T2		100			17		17			20343
	T3		100			20		20			10982
	T4		100			44		44			16931
	T5		85	15		14.5		12.3	2.2		8858
	T6		100			18.2	18.2				10982
Lechuguilla	T1	67	23	11		12.3	8.2	2.8	1.3		4977
	T2	100				50	50				7473
	T3	100				10.9	10.9				5690
	T4	63		37		19	11.9		7.1		6092
	T5			92	8	15.3			14.1	1.2	6146
Ohuira	T1	100				21.9	21.9				18249
	T2	100				23.9	23.9				11045
	T3	76	24			5.6	4.3	1.3			4643
	T4	96	4			11	10.5	0.5			4138
	T5	100				26.8	26.8				5511
	T6	80	20			1.8	1.4	0.4			1510
	T7	85	15			4.4	3.7	0.7			3220
Topolobampo	T1	100				13.1	13.1				13039
	T2	100				22.3		22.3			14936
	T3	66	25	8		3.2	2.1	0.8	0.3		2127
	T4	78	4	18		3.1	2.5	0.1	0.6		2815
Santa Maria	T1	6	22	72		22.6	1.4	4.9	16.3		11433
	T2	18	82			7.8	1.4	6.4			9192
	T3	13	11	76		24.5	3.2	2.7	18.6		10778
	T4	12	4	83		15.8	2	0.7	13.2		8098
	T5	79	11	10		7.1	5.6	0.8	0.7		4116
	T6	28	9	63		23.4	6.6	2.1	14.8		11293
	T7	5	6	89		38.6	1.8	2.5	34.3		4693
	T8		79	21		20.9	0	16.4	4.4		17474
	T9	79	11	10		2	1.6	0.2	0.2		1363
	T10	16	66	17		21	3.4	14	3.6		8179
	T11		46	54		23					12615
Navachiste	T1	82	18			27.4	22.4	5			8784
	T2	41	52	7		20.8	8.6	10.8	1.4		7231
	T3		23	77		14.7		3.4	11.3		4590
	T4	44	32	24		11.1	4.8	3.6	2.6		8310
	T5	26	74			9.8	2.5	3.2			7545
	T6	65	35			6.5	4.2	2.3			6774

Cuadro 7. (Continuación)

Sitio	Tn	Dominancia relativa %				AB total (m ² ha ⁻¹)	AB por especie (m ² ha ⁻¹)				Densidad total fustes ha ⁻¹	
		Ag	Rm	Lr	Ce		Ag	Rm	Lr	Ce		
Navachiste	T7	100				10.2	10.2				8743	
	T8	100				7.6	7.6				5588	
	T9	100				7.1	7.1				6183	
	T10	100				8.4	8.4				6151	
	T11	100				12.3	12.3				8413	
	La Reforma	T1	100				4.1	4.1				3577
		T2	100				9.3	9.3				4080
		T3	100				9	9				4367
		T4	100				10.5	10.5				2864
		T5	100				7.6	7.6				6188
		T6	70	30			14.8	10.4	4.4			5590
		T7	92	8			18.8	17.4	1.4			8774
		T8	100				10.9	10.9				3287
		T9	12	88			13.5	1.7	11.8			6336
		T10	100				26.8	26.8				22899
	T11	100				10.6	10.6				6890	
	T12	100				5.6	5.6				4340	
T13	100				12.1	12.1				4262		
T14	97	1	3		11.6	11.2	0.1	0.3		2564		
T15	85	4	11		11.3	9.7	0.4	1.2		5536		
T16					11.6	11.6				4255		
T17	100				10.2	10.2				8743		
Altata	T1	100				17.2	17.2				3573	
	T2					13.9	13.7	0.2			5299	
	T3					6.9	3.9	0.1	2.9		1930	
	T4					3.5	1.9	0	0.5	1.1	1210	
	T5	21		73	6	7	1.4		5.1	0.5	1879	
	T6	17		69	14	1.4	0.2	0	1	0.2	923	
	T7	36	26	38		31.3	11.2	8	12		9495	
	T8	100				9.8	9.8				2922	
	T9	93	6	2		18.8	17.4	1.1	0.3		3907	
	T10	100				20.6	20.6				2557	
	T11	100				5.8	5.8				5373	
	T12	75		13	11	2.9	2.2	0	0.4	0.3	994	
	T13	83	15	2		12.2	10.2	1.8	0.2		5503	
	T14	21	79			19.4	4.1	15.3			7050	
	T15	79	21			13.7	10.8	2.9			3749	
	T16	67	33			15.6	10.4	5.2			7268	
	T17	100				21	21				6965	
Cospita	T1	99		1		5.7	5.6		0		2514	
	T2	0		1		14.4	0.5		13.9		7014	
	T3	82		18		3	2.5	0	0.6		3719	
	T4	69		31		10	6.9	0	3.1		6127	
Urias	T1	99	1			15.5	15.2	0.2			2934	
	T2	100				9.1	9.1				2971	
	T3	91	9			10.4	9.4	0.9			2210	
	T4	82	4	14		8.4	6.9	0.3	1.2		2931	
Tecuaililla	T1	100				5.8	5.8				2222	
	T2	100				4.4	4.4				2523	

Cuadro 7. (Continuación)

Sitio	Tn	Dominancia relativa %				AB total (m ² ha ⁻¹)	AB por especie (m ² ha ⁻¹)				Densidad total fustes ha ⁻¹
		Ag	Rm	Lr	Ce		Ag	Rm	Lr	Ce	
Agua Grande	T1	87	2	11	23	20.1	0.5	2.4		3934	
	T2	98	1	1	27.9	27.7	0.1	0.1		2715	
	T3	99	1		5.6	5.5	0.1			2394	
	T4	100			5.1	5.1				2873	
	T5	66	24	10	16	11	3.4	1.6		4784	
	T6	80	4	17	7.5	6	0.3	1.3		3079	
	T7	52	24	24	9.4	4.9	2.3	2.2		2882	
	T8	100			3.2	3.2				1697	
	T9	100			23.3	23.3				4021	
	T10	100			18.1	18.1				5401	
	T11	59	30	11	10.8	6.3	3.2	1.2		4031	
	T12	100			10.3	10.3				2656	

Los resultados sobre estructura de manglar generados a partir de los transectos indican que la especie dominante para la mayoría de los sitios fue *Avicennia germinans*, con más del 50% de los transectos presentando valores de dominancia relativa de al menos 80%. Esta especie fue seguida del mangle rojo *Rhizophora mangle*, que tuvo amplia dominancia en los transectos llevados a cabo en bahía El Colorado, al norte del estado (Cuadro 7).

Por otra parte, aún cuando *Laguncularia racemosa* estuvo presente en aproximadamente el 40% de los transectos, fue únicamente en bahía Santa María, perteneciente al sistema Ohuira-Topolobampo donde se reconoció como dominante, obteniendo valores de dominancia superiores al 50% en 6 de los 11 transectos realizados en dicho sistema. Por su parte, el denominado falso mangle o botoncahue (*Conocarpus erectus*) fue registrado solo en cuatro de los transectos, con un valor máximo de dominancia relativa de 14%, en bahía Altata.

De acuerdo con los cálculos generados, la mayor densidad se obtuvo en uno de los transectos realizados en el sistema bahía Santa María – La Reforma, con aproximadamente 23,000 fustes·ha⁻¹, mostrando 100% de dominancia de *A. germinans* y área basal de 26.8 m²·ha⁻¹. Sin embargo, aunque individualmente los transectos de los sistemas de Ohuira-Topolobampo y Navachiste no necesariamente presentaron los mayores valores de densidad, en promedio estos sistemas lagunares obtuvieron los mayores valores de densidad, fluctuando de aproximadamente 7000 a 12000 fustes·ha⁻¹ (Cuadro 8).

De manera análoga, aunque hubo registros de densidad relativamente bajos en la mayoría de los sistemas y que el transecto con menor densidad se registró en Altata-Ensenada Pabellones, con menos de 1000 fustes ha^{-1} , en términos generales fue en los sistemas del sur de Sinaloa donde en promedio se registraron las densidades menores, con menos de 3,500 fustes· ha^{-1} (Cuadro 8). En todos los transectos realizados en esta zona, la especie predominante fue *A. germinans*, que tuvo al menos un 52% de dominancia, pero que con mayor frecuencia se registraron dominancias superiores al 90%. El área basal obtuvo valores desde 3.2 hasta 27.7 $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (Cuadro 7).

En diversos sitios se encontraron bosques monoespecíficos de *A. germinans*, especie que predominó en la mayoría de los sitios muestreados con excepción de El Colorado y en un reducido número de transectos a lo largo del estado, donde no se presentó esta especie, siendo dominante *R. mangle* en el norte, mientras que en el resto de los sitios hubo alternancia o bien no se manifestó dominancia por parte de las otras especies (Cuadro 7).

Cuadro 8. Área basal, densidad total y especie dominante por sistema y sitio de muestreo. Ag. *Avicennia germinans*; Rm *Rhizophora mangle*; Lr. *Laguncularia racemosa*; Ce. *Conocarpus erectus*.

Sistema	Sitio	AB m^2ha^{-1}		Densidad fustes ha^{-1}			especie dominante
		min	max	min	max	promedio	
Ohuira-	Bahía El Colorado	17	44.0	8858	20343	12888.3	Rm
Topolobampo	Bahía Lechuguilla	10.9	50.0	4977	7473	9847.4	Ag
	Bahía Ohuira	1.8	26.8	1510	18249	6902.3	Ag
	B. Topolobampo	3.1	22.3	2127	14936	8229.3	Ag
	Bahía Santa María	2.0	38.6	1363	17474	9021.3	Lr
Navachiste	Navachiste	6.5	27.4	4590	8784	7119.3	Ag
Santa Maria-La Reforma	Santa Maria-La Reforma	4.1	26.8	2564	22899	6150.1	Ag
Altata-Ensenada	Altata-Ensenada						
Pabellones	Pabellones	1.4	31.3	923	9445	4152.8	Ag
Ceuta	Cospita	3	14.4	2514	7014	4843.5	Ag
Urías	Estero Urías	9.1	15.5	2210	2971	2761.5	Ag
Teacapán -	Tecualilla	4.4	5.8	2222	2523	2372.5	Ag
Agua Grande	Agua Grande	3.2	27.9	1697	5401	3372.3	Ag

Los resultados obtenidos para el área de estudio de manera general señalan a *A. germinans* como la especie de mayor importancia para el estado, con dominancias que van del 30 al

100% dentro de los sistemas estudiados, mientras que *R. mangle* y *L. racemosa* aún cuando se tiene registro casi constante en todos los sitios, son registradas como especies dominantes únicamente en un par de sitios. Por su parte, *C. erectus* fue la especie con menor número de registros en el estado.

Con relación a la evaluación del Índice de Valor de Importancia (IVI), los resultados señalan que con excepción de las bahías El Colorado, Santa María y Topolobampo, localizadas en el municipio de Ahome al norte del estado, la especie con los mayores valores del IVI fue *A. germinans*, presentándose inclusive como bosque monoespecífico en el sistema de Teacapán-Agua Grande, al sur del estado (Sitio Tecualilla). En contraste, la bahía El Colorado fue el único sitio donde no hubo registro de esta especie y donde los valores del IVI para *R. mangle* tuvieron mayor relevancia, conjuntamente con la bahía de Topolobampo ambas localizadas en el sistema Ohuira-Topolobampo (Cuadro 9).

Cuadro 9. Índice de Valor de importancia (IVI) por especie, en los Sistemas lagunares y bahías de Sinaloa. Ag. *Avicennia germinans*; Rm *Rhizophora mangle*; Lr. *Laguncularia racemosa*; Ce. *Conocarpus erectus*.

Sistema lagunar	Sitio	Especie			
		Ag	Rm	Lr	Ce
Ohuira-Topolobampo	Ohuira	241	59	0	0
	Lechuguilla	156	89	55	0
	Colorado	0	183	51	65
	Santa Maria	75	100	125	0
	Topolobampo	103	152	45	0
Navachiste	Navachiste	147	77	76	0
Santa María-La Reforma	Santa María-La Reforma	204	61	35	0
Altata-Ensenada Pabellones	Altata-Ensenada Pabellones	163	50	58	28
Ceuta	Ceuta	173	0	127	0
Urias	Urias	211	38	51	0
Teacapán-Agua Grande	Tecualilla	300	0	0	0
	Agua Grande	211	45	44	0

6.3. Relación estructura forestal – respuesta espectral

Como se señaló anteriormente, a partir del proceso híbrido de clasificación del manglar, se obtuvo un número variable de clases, que por afinidad espectral fue reducido o ajustado a

cuatro clases de manglar, que asocian la respuesta espectral con el vigor y biomasa de la cobertura de manglar. Como ya fue señalado en métodos, el manglar Tipo 1 es el que presenta un mayor desarrollo estructural, por lo que se asocia con bosque denso, mientras que el manglar tipo 4 puede ser descrito como mangle tipo matorral o de escasa densidad. Los dos tipos restantes se ubican entre ambos extremos.

Considerando que para cada imagen (seis en total) se registró manglar de los cuatro tipos (m1, m2, m3, m4), se obtuvieron los valores promedio de las firmas espectrales correspondientes, generándose de esta manera una matriz de tamaño 6 x 24 (número de bandas x tipos de manglar en las seis imágenes). Esta información fue utilizada para llevar a cabo el análisis de cúmulos (cluster), que permitiera definir la posible afinidad entre firmas espectrales y tipos de manglar. El resultado en forma de dendrograma se presenta en la Figura 14.

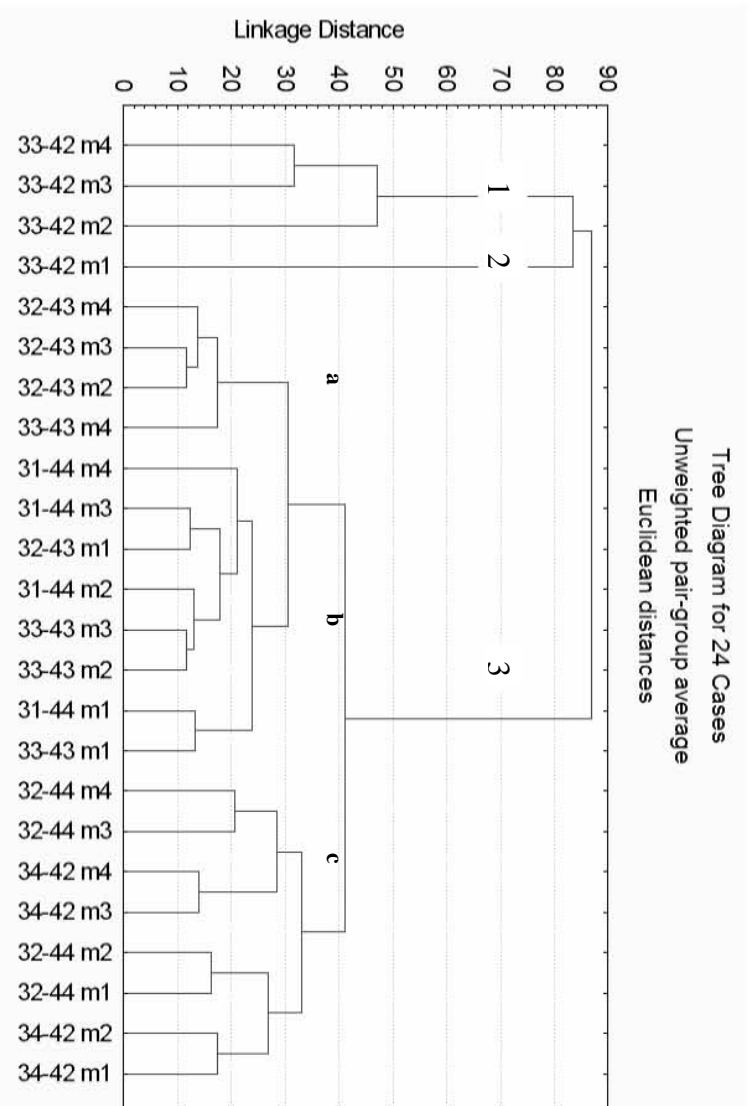


Fig. 14. Clasificación de los tipos de mangle (m) de acuerdo a los valores promedio de su firma espectral, determinados para Sinaloa por medio de análisis digital de seis imágenes Landsat ETM+ (definidas por su path-row).

De acuerdo con el criterio de separación (distancia euclidiana ≥ 70), se generaron tres cúmulos principales, uno de los cuales cuenta con un solo elemento (2), correspondiente al manglar de tipo 1 (m1) de la imagen con path-row 33-42, donde se ubica el sistema Navachiste. Muy próximo a este elemento se agrega un cúmulo con tres elementos (1), también pertenecientes a la imagen 33-42, por lo que esta imagen quedo separada del resto de las escenas analizadas.

Posteriormente se define un grupo (3) con tres subconjuntos, donde se separan los cuatro tipos de manglar correspondientes a la imagen 32-43 (centro de Sinaloa, 3a), presentando las mínimas distancias dentro del análisis. Finalmente los grupos 3b y 3c indican una posible afinidad entre los manglares de tipo 1 y 2 y entre los tipos 3 y 4, sin que necesariamente corresponda a una distribución geográfica particular, pues el grupo 3b incluye principalmente manglares tipo 1 y 2 de la zona sur (31-44) y de la zona norte (33-43), mientras que el grupo 3c está conformado por manglares de los 4 tipos de las imágenes 32-44 (centro de Sinaloa)y 34-42 (norte de Sinaloa).

6.4. Estimación de cambios espaciales y temporales en la distribución de manglar

Siguiendo el procedimiento establecido para la clasificación de imágenes, el total de cobertura de manglar estimado para Sinaloa en el año 1973 fue de 65,109 ha y aunque esta aproximación es mayor que la evaluada para los años 2000-2003, en términos generales el patrón de distribución es el mismo. De manera global, se observó una disminución del 6.4 % en la cobertura, obteniendo como resultado un total de 61423 ha, con una diferencia neta de 3686 ha, lo que indica una tasa de pérdida menor al 1% de manglar al año.

Entre los sistemas que mayor pérdida de manglar reportaron, se encuentran Altata-Ensenada Pabellones y Teacapán-Agua Grande con 1381 y 861 ha respectivamente, mientras que Urías, a pesar de ser un sistema en el que se esperaría un alto impacto antropogénico debido a su cercanía con zonas urbanas (Mazatlán), fue el sistema que menor cambio reportó durante este periodo de tiempo (124 ha). Otro de las variaciones notables reportadas, fue el aumento de la cobertura en los sistemas de Navachiste y Santa María-La Reforma los cuales mostraron un incremento de entre 300 y 400 hectáreas (Cuadro 10).

Cuadro 10. Superficie en hectáreas de la cobertura de manglar en los principales sistemas costeros de Sinaloa.

Sistema lagunar	1973	2000-2003	Diferencia
	Hectáreas		
Ohuira-Topolobampo	11,569	10,795	-774
Navachiste	10,032	10,365	333
Santa María-La Reforma	15,543	15,947	404
Altata-Ensenada Pabellones	9,025	7,644	-1,381
Ceuta	6,274	5,547	-727
Urías	999	876	-123
Huizache-Caimanero	1,431	874	-557
Teacapán-Agua Grande	10,236	9,375	-861
Total	65,109	61,423	-3,686

Los resultados obtenidos fueron separados de acuerdo a la ubicación geográfica de los sistemas lagunares, situando en la Zona Norte a Ohuira-Topolobampo, y Navachiste, en la Zona Centro a Santa María-La Reforma, Altata-Ensenada Pabellones y Ceuta, mientras que el la Zona Sur incluye a Urías, Huizache-Caimanero y Teacapán-Agua Grande.

Dentro de la zona norte, la segunda en extensión de manglar, después de la zona centro, con alrededor de 21,100 ha, se observó que el 61% de la cobertura de manglar se mantuvo sin cambios notables en cuanto extensión espacial se refiere, sin embargo, se registraron pérdidas de mas de 5,000 ha principalmente en la porción norte de bahía Lechuguilla y la zona aledaña a la ciudad de Topolobampo. No obstante, la mayor parte de las hectáreas registradas como perdidas fueron compensadas por la presencia de manglar en áreas que para el año 1973 no presentaban esta vegetación, principalmente en la bahía de Navachiste donde fue notable el incremento del manglar. Como resultado y tomando en cuenta las ganancias reportadas, se obtiene una pérdida total de 441 ha para la porción norte del estado (Figura 15).

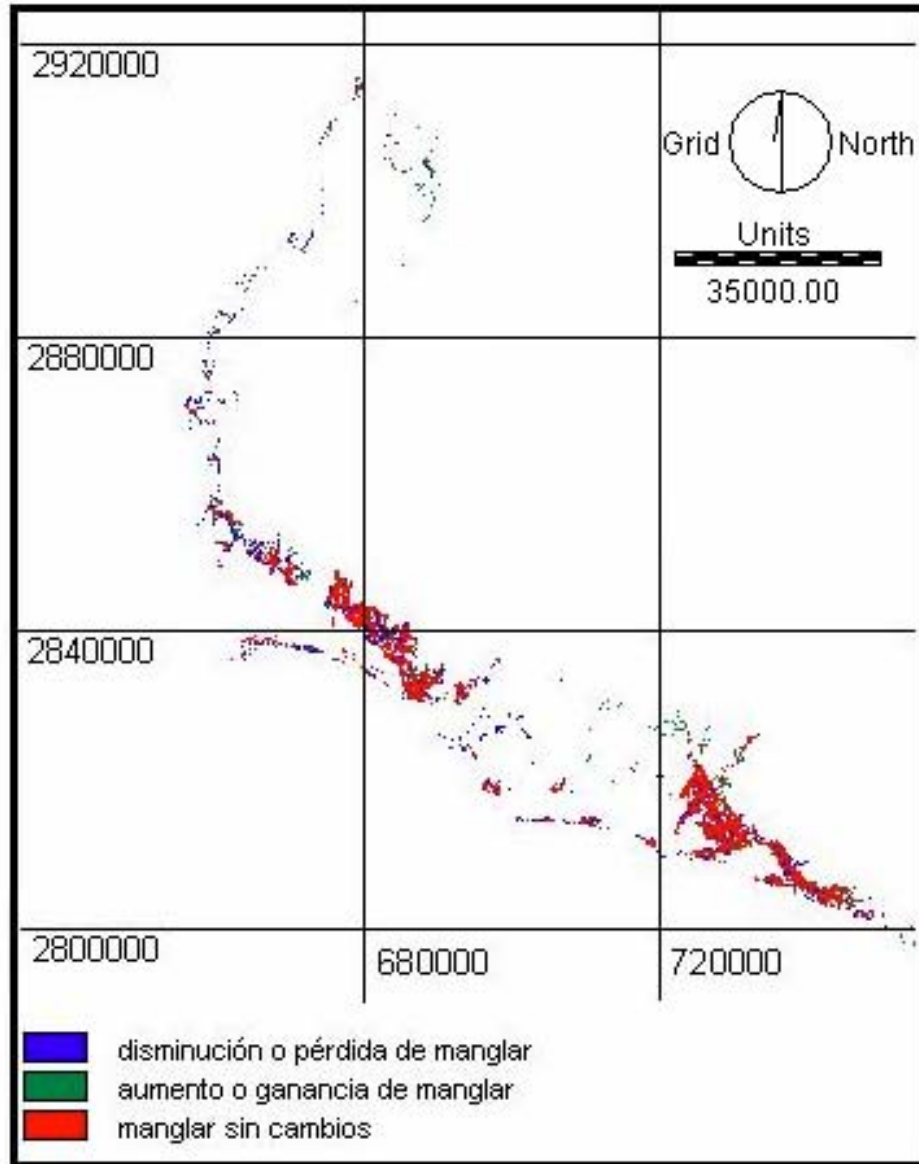


Fig. 15. Cambios registrados para la cobertura de manglar en la zona norte del estado.

La porción central de Sinaloa, la cual presenta la mayor cobertura de manglar en el estado (48%), fue la zona donde se observó el cambio más considerable de extensión durante el periodo de estudio, con una disminución neta de 2039 ha, de las cuales más de la mitad (1381 ha) fueron registradas en Altata-Ensenada Pabellones, sitio en el que la variación en extensión fue la más alta de todo el estado. El sistema Ceuta presentó pérdidas de 727 ha, mientras Santa-María-La Reforma presentó un aumento de manglar de 404 ha distribuidas en diversas áreas del sistema (Figura 16).

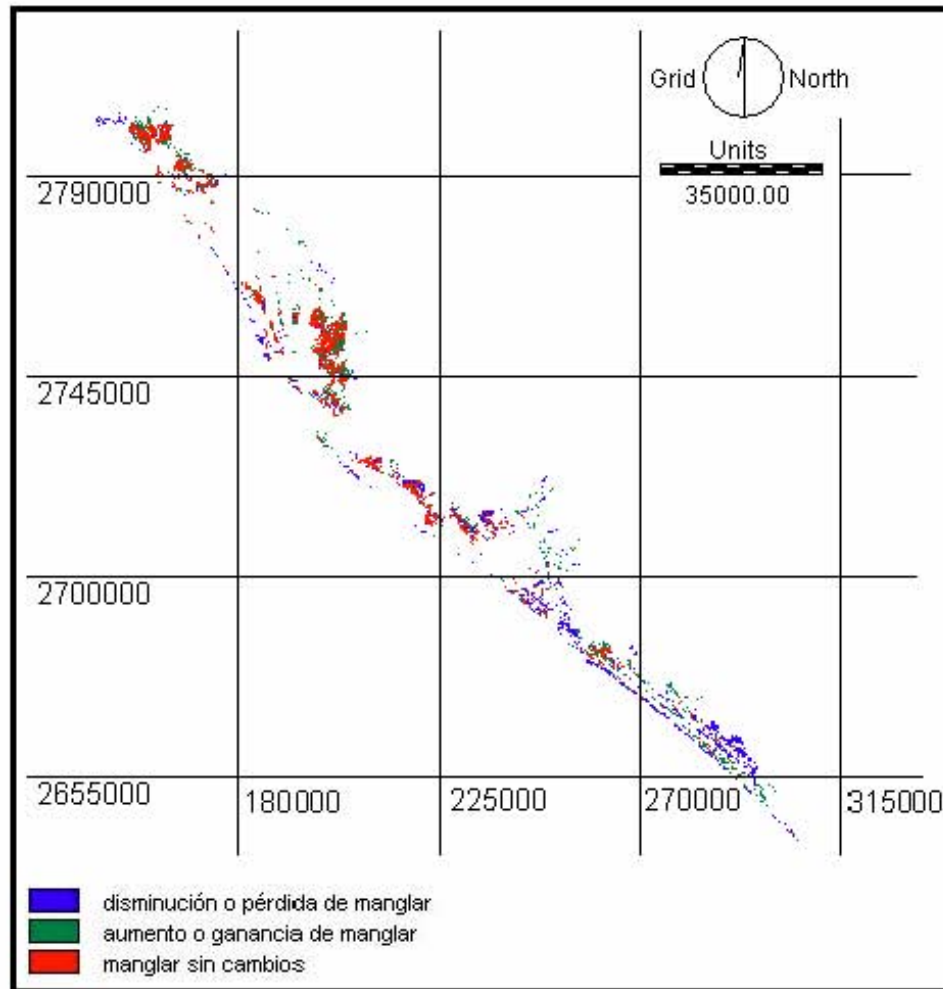


Fig. 16. Cambios registrados para la cobertura de manglar en la zona centro del estado

En relación a la parte sur del estado, los datos generados indican que el manglar ha sufrido pérdidas superiores a las 1,500 ha, en su mayoría pertenecientes al sistema Agua grande, en el que se puede observar la disminución del manglar en la parte continental de la laguna y en la zona donde limita Sinaloa con Nayarit, donde la vegetación está en condiciones de estrés. Por su parte, el sistema Urías fue el que presentó una menor pérdida en el periodo de tiempo estudiado, con una disminución apenas superior a las 100 hectáreas (Figura 17).

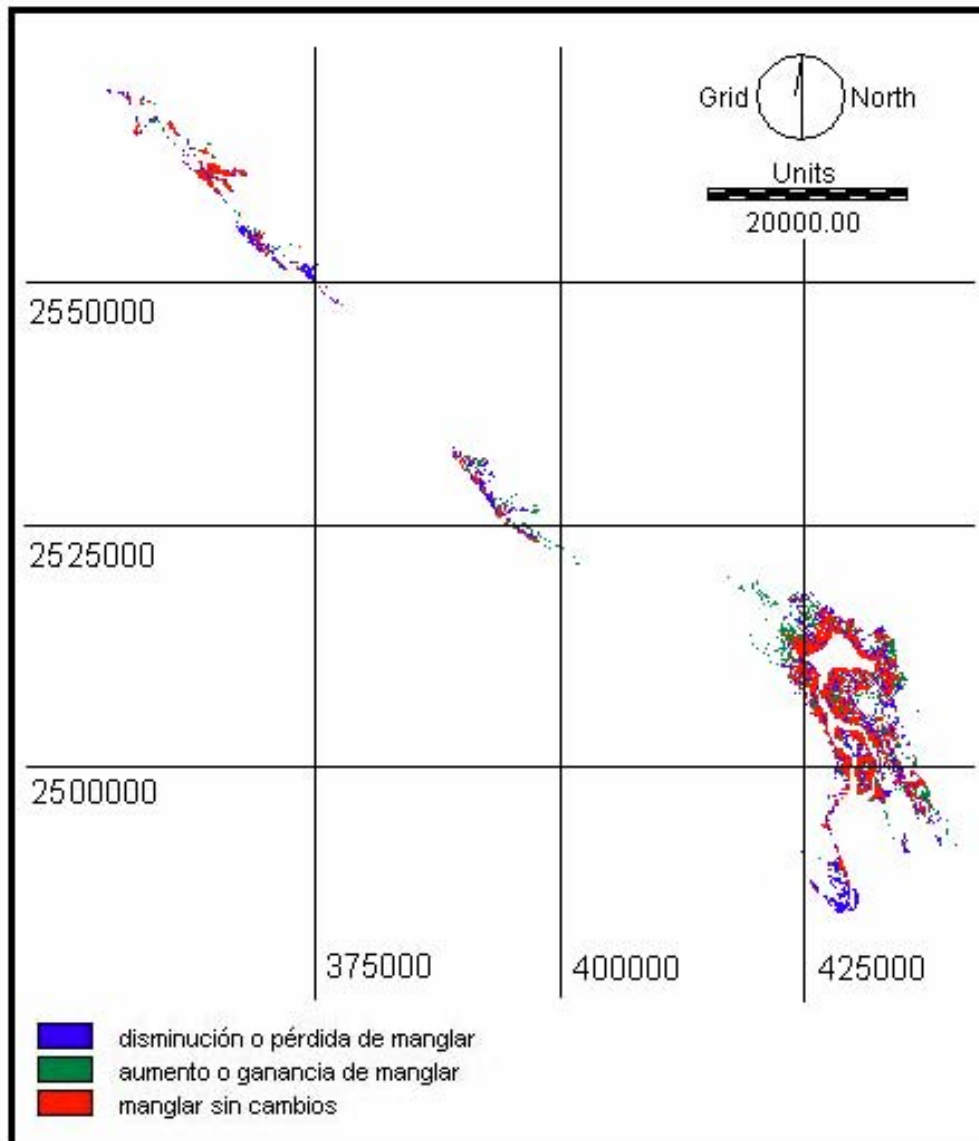


Fig. 17. Cambios registrados para la cobertura de manglar en la zona sur del estado.

6.5 Caracterización del manglar

Como objetivo final de este trabajo se consideró la caracterización del manglar en Sinaloa, partiendo de la propuesta de que dicha caracterización estaría basada en la integración de los resultados del trabajo de análisis digital de imágenes, de los generados con la realización de transectos y del contraste de la información de campo con la de carácter espectral.

Por lo anterior, los resultados obtenidos permiten describir al manglar de Sinaloa como una cobertura vegetal con distribución heterogénea, que concentra la mayor cobertura en las zonas norte (municipios de Ahome, Guasave Angostura y parte norte de Navolato) y centro (municipios de Navolato en su parte sur, Culiacán, San Ignacio y Elota) del estado, siendo los sistemas lagunares Ohuira-Topolobampo y Santa María-La Reforma los sitios con mayor extensión mientras que el sistema Urías ubicado al sur de Sinaloa registró la menor presencia de esta vegetación. Cabe mencionarse que no se efectuó ningún análisis que permitiera relacionar superficie acuática con la cobertura de manglar, ya que bajo ese esquema es probable que Huizache-Caimanero y Ensenada del Pabellón puedan tener la menor concentración de manglar.

De los resultados generados por el análisis *in situ* de la estructura forestal del manglar, se observó que la especie dominante para el estado, es el mangle negro o cenizo *Avicennia germinans*, siendo además la especie que presentó el mayor índice de valor de importancia (IVI). Siguiendo en orden de importancia con respecto a la dominancia, las especies *Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa* se registraron a lo largo del área de distribución del manglar en Sinaloa, sin embargo solo la primera es dominante en la parte norte del estado, mientras que *L. racemosa* nunca presentó una dominancia clara, con excepción de escasos transectos que no superan el 10% del total. Por su parte la especie *Conocarpus erectus* es la de menor presencia en el estado, aunque esto es resultado en parte del método de muestreo, ya que en la mayoría de los casos se iniciaron en el extremo opuesto de su área de distribución.

Independientemente de su composición, hubo una importante variación en los resultados correspondientes a densidad, aún en transectos llevados a cabo en sitios próximos dentro del mismo sistema lagunar. Los resultados generados señalan que los sitios con mayor densidad de manglar se ubican en los sistemas Ohuira-Topolobampo y Navachiste registrando además las más elevadas áreas basales. En contraste, el sistema Urías es el lugar con la menor densidad reportada. En general la densidad del manglar de Sinaloa, de acuerdo a los resultados del presente estudio, se situaron dentro de un intervalo de poco más de 900 a un número ligeramente menor de 23,000 fustes·ha⁻¹ y con áreas basales desde 2 a 50 m²·ha⁻¹.

En términos de su conservación, los cambios observados por comparación de imágenes de 1973 a 2000-2003, indican un patrón de distribución estable durante con tasas de deforestación anual de manglar menores al 1% para el estado. Las localidades con mayor

pérdida de esta cobertura se ubican el los sistemas Altata-Ensenada Pabellones y Teacapán-Agua Grande, mientras que Urías es el sistema en el que se generó el menor cambio. Por su parte, Navachiste y Santa María-La Reforma presentan un incremento en la cobertura en sitios donde no se tenía registrada la presencia de esta vegetación para las escenas que datan de 1973.

7. DISCUSIÓN

El manglar es uno de los ecosistemas costeros tropicales más importantes debido a su elevada productividad y considerando las múltiples funciones (entre las que puede mencionarse la sustentabilidad de la biodiversidad de la zona intermareal) y servicios ambientales que proporciona. Dada la presión a la que se encuentran sometidas estas comunidades vegetales tanto por causas antrópicas como por eventos naturales, es necesario analizar su situación actual y conocer los cambios y perturbaciones que ha sufrido esta cobertura a través del tiempo, a fin de determinar las variaciones que se presentan en estos ecosistemas costeros. Por otra parte, es importante contar con un inventario actualizado que permita conocer tanto la distribución como las características generales de la estructura del manglar tanto a nivel local como regional a fin de generar datos reales y confiables que permitan el manejo adecuado de esta vegetación. En términos amplios estos fueron parte de los objetivos del presente estudio, mismos que se cumplieron en lo general.

Como parte de la propuesta general, el presente estudio estableció una serie de objetivos particulares para alcanzar el objetivo central. Dentro de estos, se consideró la estimación de la cobertura actual (2000-2003) del manglar a nivel estatal. Asimismo se desarrolló un análisis digital de imágenes de satélite para estimar la cobertura de manglar en épocas previas (1973) y partiendo de la comparación de ambas evaluaciones, determinar los cambios en extensión que han sufrido el ecosistema de manglar durante el periodo comprendido entre ambas fechas. También se estableció como parte de los objetivos el análisis de la estructura forestal en diversas localidades del estado y considerando los resultados derivados del análisis de las imágenes, encontrar la posible relación entre las firmas espectrales generadas por medio de la clasificación de imágenes y los datos de estructura forestal obtenidos *in situ* durante el trabajo de campo.

Cada uno de los objetivos fue satisfecho con mayor o menor grado de éxito, particularmente considerando la amplitud del área de estudio (más de 600 km de litoral y más de 60,000 ha de manglar), las características de las imágenes, especialmente lo que se refiere a la resolución espacial, que en el mejor de los casos correspondió a píxeles de

aproximadamente 28 m por lado y a la resolución espectral, que aún fue menor en las imágenes correspondientes a la fecha de 1973.

Considerando lo anterior, el uso de herramientas como la percepción remota permite generar resultados correspondientes a grandes áreas, con mayor velocidad, a un menor costo y con un alto grado de confiabilidad, de forma que los resultados obtenidos sean útiles para el implemento de nuevas estrategias de manejo del manglar. En ese sentido, son varios los autores que coinciden en la eficacia de estas técnicas para la evaluación de manglar, con un alto nivel de exactitud (Biña *et al.* 1980; Palaganas, 1992; Vits y Tack, 1995, Green *et al.* 1998). En el presente trabajo, como en otros que se han realizado a nivel estatal (Ramírez-Zavala, 1998; Gurrola-López, 2000; Trelles-Ríos, 2002; Acosta-Velázquez, 2003; Martínez-Santos, 2003;), se ha buscado que el nivel de exactitud en las clasificaciones obtenga valores superiores al 80% para considerarse como aceptables, de acuerdo a la clasificación de Landin y Koch (1977) citada por Congalton y Green (1999). Para este estudio, los niveles de exactitud global correspondientes a la clasificación de las imágenes más recientes estuvieron siempre por arriba del 90%, lo que nos indica una alta concordancia en la clasificación de las imágenes con respecto a los datos de referencia. En relación al coeficiente de Kappa, también evaluado en el presente estudio, el valor obtenido fue de 0.89 por lo que, siguiendo los lineamientos de Lillesand *et al.* (2004), se considera que existe un fuerte grado de concordancia entre los datos de referencia (puntos de control) y los obtenidos en la clasificación de los mapas temáticos. Este nivel de exactitud resulta poco frecuente en este tipo de estudios, pero debe considerarse que a diferencia de otros trabajos de esta naturaleza, la cobertura de manglar fue prácticamente aislada del resto de las coberturas vegetales por medio de la digitalización de máscaras, lo que aumentó la eficiencia de la clasificación.

Aún así, la clasificación no es totalmente exacta ya que si bien el manglar es la vegetación dominante en la zona costera en las regiones tropicales y subtropicales (Field, 1998), no es la única y esto puede generar confusión en la clasificación final. Aun con esta observación, los resultados obtenidos se consideran adecuados, particularmente al tomar en cuenta las dimensiones y características del área de estudio, que difícilmente podría abarcarse únicamente con trabajo de campo convencional, o bien por otros medios tales como el uso de fotografía aérea que raramente cubre toda la región de manera regular, lo que imposibilita

análisis de variación temporal como el que se incluye en el presente trabajo. De manera específica, en el presente trabajo, fueron utilizadas 6 imágenes Landsat MSS que datan de 1973 y 6 ETM+ de años recientes (2000-2003), que permitieron la comparación de la cobertura de manglar presente en ambas fechas.

Al respecto cabe mencionarse que en cuanto a extensión de manglar se refiere, la cobertura total estimada para el área de estudio en fechas recientes fue de aproximadamente 62,000 ha, resultado que se sitúa por debajo de las estimaciones obtenidas por Ruiz *et al.* (2005) quienes reportan aproximadamente 75,000 ha para la misma zona, obtenidas por medio del análisis de imágenes Landsat del año 2005. Estos últimos resultados concuerdan parcialmente con lo obtenido por Carrera y De la Fuente (2003) quienes realizaron un inventario de las principales coberturas de la zona de humedales para México utilizando imágenes Landsat TM que datan de 1993, señalando un total de 73,974 ha. En ambos casos la diferencia con los resultados obtenidos en el presente estudio es de más de 10,000 hectáreas, sin embargo dado que los resultados de este trabajo fueron agrupados en asociación con los principales sistemas lagunares del estado no ha sido posible la comparación con lo reportado por dichos autores debido a que ellos presentan sus resultados utilizando una zonificación diferente. Dadas las diferencias y aunque las fechas analizadas corresponden a años distintos, se propone la comparación de los mapas temáticos resultantes en los diferentes estudios, a fin de determinar donde se ubican las principales diferencias. Sin embargo esto escapa del alcance del presente trabajo y únicamente ha sido posible determinar, por lo menos con el trabajo de Ruiz *et al.* (2005), que las diferencias principales se encuentran al interior de los polígonos, por lo que se asume que algunas clases de manglar fueron excluidas (error de omisión) dentro del presente trabajo o por el contrario, que se integraron clases correspondientes a otro tipo de cobertura (error de comisión), dentro del trabajo de Ruiz y colaboradores.

Con relación a otros autores que han trabajado a nivel de sistema lagunar, las diferencias no son tan notables. Ruiz-Luna *et al.* (2005), Berlanga-Robles *et al.* (2005) y Hernández-Cornejo *et al.* (2005) estiman coberturas similares para la zona norte del estado, en Ohuira-Topolobampo y Navachiste. Con relación a los resultados de la zona centro del estado, las estimaciones registradas se aproximan a los datos reportados por Arenas y Flores (1991) para el sistema Ensenada Pabellones y por Gurrola-López (2000) y Ruiz-Luna *et al.* (2005)

para la zona de Santa María-La Reforma. Por otra parte, las estimaciones para la zona sur y de manera particular el sistema Urías, presentó la mayor variación en relación a lo publicado por Ramírez-Zavala (1998) y Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (2003) quienes obtuvieron valores que oscilan entre las 650 y las 770 ha de manglar, en tanto el resultado generado en esta clasificación fue menor de 1,000 ha. Es importante señalar que los datos presentados en este estudio incluyen otras áreas aledañas a Mazatlán en las que se encuentran parches de esta vegetación como es el caso del Estero del Yugo ubicado al norte de dicha localidad. En esta misma zona, en el sistema Teacapán-Agua Grande, la cobertura obtenida presenta similitud con lo reportado por Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2002).

Es importante hacer notar que aunque existen numerosas publicaciones en donde se utilizan técnicas de percepción remota para evaluar la extensión y algunas otras características de los manglares (Paterson y Rehder, 1985; Green *et al.* 1997; Ramírez-García *et al.* 1998; Manassrisuksi *et al.* 2001; Manson *et al.* 2001), no existe una técnica única que sea aplicada a nivel mundial y dependiendo de ello se obtendrán distintos resultados (Green *et al.* 2000). En el presente estudio se aplicó una técnica de tipo híbrida, con el objeto de afinar la clasificación del manglar tanto a nivel general, como por tipo. Sin embargo, cualquiera que sea la técnica empleada, se recomienda que para el análisis y comparación de imágenes de fechas distintas, se clasifiquen de manera independiente y se comparen posteriormente (análisis multitemporal postclasificatorio) (Mas, 1997).

En ese sentido y considerando los antecedentes que se tienen en países como Ecuador y Filipinas donde la camaronicultura ha tenido efectos negativos sobre los sistemas de manglar (Honculada-Primavera, 1993; Boyd y Clay, 1998) se ha llegado a asumir que la deforestación del manglar ocurre de manera proporcional al área ocupada por el desarrollo de esta actividad. Para el caso concreto de Sinaloa, la camaronicultura es una de las actividades que mayor presencia e importancia ha tenido en la zona costera durante las últimas dos décadas, la cual se ha desarrollado más profusamente en la porción norte y centro del estado (Ruiz-Luna *et al.* 2004; 2005). Este desarrollo y los antecedentes señalados han ocasionado que se señale a la camaronicultura como una de las principales causas de destrucción del manglar en el estado y aunque no se indica de manera precisa la magnitud del impacto, si se ha considerado como

una actividad fuertemente perturbadora del manglar (Flores-Verdugo 1989; Agraz-Hernández, *et al.* 2001).

Este tipo de antecedentes fue considerado al inicio del presente estudio, asumiendo que habría diferencias significativas en la extensión de manglar, con tendencias negativas, como consecuencias del desarrollo de esta actividad, que inicia en los 80 y actualmente ocupa en el estado una superficie de aproximadamente 40,000 ha, equivalentes aproximadamente al 60% del área de manglar estimada para Sinaloa en trabajos previos (Suman, 1994). A diferencia de lo que se presumía en función de la literatura consultada, el manglar no ha sido la cobertura más afectada por la ubicación de desarrollos camaronícolas, ya que no se detectaron cambios importantes en la zona norte del estado donde se presenta el mayor número de granjas. Si hay cambios en las zonas centro y sur, pero de acuerdo a Ruiz *et al.* (2005), la cobertura de manglar no se ha visto afectada de forma directa por la construcción de granjas debido a que la mayoría de ellas se ubican lejos de la zona de distribución de esta vegetación, lo que ha permitido que el manglar se mantenga sin cambios considerables y estimando una pérdida total de manglar para el estado menor al 1% del total obtenido en 1973.

A pesar de lo anterior, no se debe menospreciar la influencia que ha tenido la camaronicultura además de otras actividades de importancia económica a nivel estatal como es la agricultura, que también se desarrolla a lo largo de la planicie costera del estado, las cuales con el uso de grandes volúmenes de fertilizantes, pesticidas y otros compuestos químicos causan problemas tanto en la degradación de suelos como en la reducción de la calidad del agua, afectando de manera directa los ecosistemas costeros y principalmente el desarrollo estructural del manglar, generando con su construcción barreras que limitan el intercambio de agua y nutrientes entre los sistemas costeros provocando efectos negativos en los procesos ecológicos que ahí se desarrollan.

De los resultados obtenidos para un periodo de treinta años en algunos de los casos, la cobertura del manglar en el estado de Sinaloa no presentó un marcado cambio de extensión y aunque se estimó que existe una reducción, ésta fue menor de 6.5%, lo que representa una tasa de deforestación anual de aproximadamente 0.25%. Esta tasa es inferior a lo reportado por Pantoja *et al.* (1991), Ramírez-Zabala (1998), Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (1998, 1999a) para diferentes áreas de manglar en Sinaloa y por Pérez y Pérez (1991), Acosta-Velázquez

(2003) y Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2002) para Celestún y Marismas Nacionales, respectivamente. Los autores citados proponen tasas de deforestación que van de (0.2 a 1.9%) y aunque estos niveles son probables a nivel local, en términos generales no son tan elevados como proponen López-Portillo y Ezcurra (2002), de aproximadamente 5% anual a nivel nacional.

Con una visión similar, Yáñez-Arancibia *et al.* (1993) estiman una pérdida de hasta el 70% del manglar en México para un periodo similar al aquí analizado, aunque de los resultados del presente estudio se concluye que al menos para dos de los principales sistemas de Sinaloa (Navachiste y Santa María-La Reforma), esta cobertura se ha incrementado en más del 3% del total de hectáreas registradas a principios de los 70, lo que permite suponer que la pérdida del manglar no es tan elevada como indican los autores mencionados. A una conclusión similar arriban Ruiz *et al.* (2005), quienes encuentran que lejos de disminuir la cobertura de manglar en Sinaloa, ésta se ha mantenido relativamente estable a partir de los 70. Sin embargo atribuyen sus resultados al mejoramiento de las capacidades técnicas de los satélites y consideran que si bien no ha habido una variación extrema en términos de extensión, si se ha dado un empobrecimiento en la calidad de los manglares.

En cuanto a los parámetros estructurales se refiere, en los datos obtenidos en el área de estudio se observa que los valores de densidad más elevados se presentan en la parte norte del estado, incluyendo a los sistemas lagunares principales (Ohuira-Topolobampo y Navachiste) y sus respectivas bahías, presentando alta variabilidad que va de los 4,500 fustes ha^{-1} para bahía Ohuira, localizada en el sistema lagunar Ohuira-Topolobampo, a los 13,500 fustes ha^{-1} en bahía El Colorado perteneciente al mismo sistema. En este lugar se reportó el valor más elevado de área basal para todo el estado de hasta $35.6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ lo que indica un alto grado de desarrollo estructural del sitio, valor que supera también a otros sitios del Pacífico mexicano como es el caso Boca Cegada y Agua Brava, ambos en el estado de Nayarit donde el área basal reportada por Flores *et al.* (1992) es de 28.8 y $22.3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. En esta región se localizaron las cuatro especies de manglar, siendo *A. germinans* y *R. mangle* las que se presentaron con mayor frecuencia, seguidas de *L. racemosa*, mientras que *C. erectus* fue la especie de menor abundancia.

Para el centro del estado, los valores de densidad para los sistemas de Ceuta y Santa María-La Reforma no presentaron variabilidad en la densidad, la cual fue de los 4,200 a los 4,750 fustes ha^{-1} respectivamente, mientras que los valores de área basal estuvieron en un intervalo de entre 7 y 11 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$. En ambos sistemas la especie dominante fue *A. germinans*.

En el caso particular del sistema Altata-Ensenada Pabellones, la densidad observada fue de 2944 fustes ha^{-1} con un área basal de 9.7 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$, valores que difieren de lo reportado por Arenas y Flores (1991) quien registra para ese sitio densidades que van de los 5590 a los 10,700 fustes ha^{-1} y de 40 a 73 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ de área basal. Es importante señalar que dichas estimaciones se basan en un total de 6 transectos, que no pudieron ser comparados con ninguno de los 17 transectos realizados en ese sistema dentro del presente estudio debido a que los datos de Arenas y Flores (1991) no se encuentran georreferenciados. Para la misma zona Bojórquez-Leyva (2002) señala valores de 1457 fustes ha^{-1} y 13.88 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ de área basal, resultados en ambos casos inferiores a los obtenidos dentro del presente estudio, lo que nos indica una alta heterogeneidad dentro del sistema. Por lo anterior, la diferencia entre los citados estudios con el presente pueden deberse a variaciones en las localidades muestreadas, ya que de acuerdo a observaciones personales puede cambiar de manera importante aún entre puntos cercanos, o bien a que de manera específica se ha ido deteriorando la calidad del manglar en esa región.

Por último, considerando los escasos trabajos que sobre estructura forestal de manglar se han generado dentro del estado, se cuenta con la información de Agraz-Hernández (1999) y de Bojórquez-Leyva (2002) para el sistema de Urías en la zona sur del estado, quienes reportan valores de densidad, área basal y frecuencia de especies similares a las obtenidas dentro del presente estudio. Estos valores están comprendidos dentro del intervalo de 1,541 a 3,622 fustes ha^{-1} de densidad y de 6.5-15.5 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$

Por lo que toca a la relación entre los valores o firmas espectrales generadas por medio de la clasificación de imágenes de satélite, fue posible integrar grupos pertenecientes a cuatro tipos fisonómicos de manglar, que de alguna manera fueron muestreados durante el trabajo realizado en campo. El intento de asociar dichas firmas espectrales con los datos de estructura forestal tuvo cierto nivel de éxito que deberá ser confirmado con un mayor número de muestras. El uso de métodos estadísticos multivariados, específicamente de clasificación

(cluster) permitió la separación de grupos con respuestas espectrales semejantes, que correspondían a diferente desarrollo estructural. Sin embargo, como ya se señala anteriormente, tanto los datos de campo como el análisis de las imágenes de satélite indican que hay una elevada heterogeneidad en la distribución geográfica de los tipos de manglar, aún dentro de localidades próximas.

Aunque se cuenta con información sobre la posición geográfica aproximada de inicio de la mayoría de los transectos, no fue posible contar con la orientación y posición final de estos, debido a la limitada capacidad de recepción de la señal satelital de los GPS, que se atenúa hasta perderse cuando el dosel del manglar es relativamente elevado (>2.5 m) y denso. Aunado a ello, el tamaño de los transectos realizados no es del todo compatible con la resolución espacial del satélite para fines de comparación, ya que la longitud máxima de los transectos fue de 200m, mismos que corresponden aproximadamente a 7 píxeles en línea recta. Por lo anterior, no fue posible una comparación total y dado que en algunos casos existe proximidad de píxeles correspondientes a diferentes tipos de manglar, no fue posible obtener un indicador directo que relacione tipo de manglar, con valores de estructura forestal. Se considera que son necesarios estudios posteriores a fin de determinar con mayor exactitud la correspondencia de los grupos fisonómicos de manera independiente a su ubicación geográfica, lo cual podría permitir el establecimiento de medidas de manejo para los ecosistemas de manglar.

Finalmente y en función de los resultados y las observaciones que hasta el momento se han presentado, se puede concluir que para Sinaloa, la condición actual del manglar puede describirse como de mediana a alta densidad y con sitios de elevada área basal en comparación con otros manglares registrados en el noroeste del país, con excepción de los localizados en la región de Marismas Nacionales en Nayarit. Las densidades varían dentro del estado, registrándose las más elevadas para la porción norte del estado en el sistema Ohuira-Topolobampo, mientras que las más bajas se reportaron en la zona sur en el área de estudio perteneciente al sistema Teacapán-Agua Grande. Aunque se presentan las cuatro especies de manglar reportadas para el noroeste de México, *Avicennia germinans* es la especie dominante, seguida por *Rhizophora mangle* la cual se presenta de manera general bordeando las lagunas estudiadas, desarrollándose en una franja continua pero no muy extensa. Por su parte,

Laguncularia racemosa se presenta como la tercera especie de mayor distribución en el estado, mientras *Conocarpus erectus*, que es la menor reportada, se presentó en la periferia del manglar, en la porción más terrestre del área de estudio.

Por último es importante señalar que se ha dado una reducción de aproximadamente 6.4% en la cobertura de manglar estimada para el 2000-2003, con relación a la estimada para 1973, donde los tipos fisonómicos dominantes en la actualidad corresponden principalmente a los denominados Tipo 2 (Concentración media de clorofila y biomasa elevada) y Tipo 1 (Concentración alta de clorofila y biomasa elevada), que si bien corresponden a bosques y matorrales relativamente sanos, de acuerdo con la información espectral derivada del análisis de las imágenes, han visto reducida su calidad con relación a lo observado para 1973, de acuerdo a lo propuesto por Ruiz-Luna *et al.* (2005). Lo anterior implica que aunque el impacto ecológico derivado de los cambios de uso de suelo y reducción de coberturas naturales del paisaje costero de Sinaloa no se ha manifestado como reducción considerable en la extensión de los sistemas de manglar en Sinaloa, si está teniendo un efecto negativo en el mantenimiento de la calidad de estos importantes ecosistemas.

8. CONCLUSIONES

- Considerando la extensión y distribución de los manglares de Sinaloa, se concluye que el análisis de imágenes de satélite es una herramienta de alta utilidad para fines de inventario, que permitió estimar la cobertura del manglar en Sinaloa para años recientes con valores de exactitud elevados, estimando un total de aproximadamente 62,000 hectáreas, de las cuales, alrededor del 80% se presentan en los sistemas lagunares ubicados al norte y centro del estado.
- De manera complementaria, los resultados del análisis *in situ* de la estructura forestal del manglar indican que dentro del área de estudio, los manglares presentan una amplia heterogeneidad dentro y entre los sistemas lagunares estudiados, presentando densidades que van de los 900 a los 23,000 fustes ha^{-1} y áreas basales desde 2 a 50 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$, siendo los sistemas Ohuira-Topolobampo y Navachiste los sitios que mostraron un mayor desarrollo estructural.
- Se registraron las cuatro especies de manglar reportadas para la porción norte del pacífico mexicano, donde el patrón de importancia por especie fue *Avicennia germinans* > *Rhizophora mangle* > *Laguncularia racemosa* > *Conocarpus erectus*. De manera general la especie con valores más elevados de área basal fue *Laguncularia racemosa* presentando hasta 22 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$. La especie con mayor cobertura fue *A. germinans* siendo la única que presentó zonas amplias de distribución formando bosques monoespecíficos, en contraste, *C. erectus* se observó en parches aislados generalmente asociados a la parte terrestre y con escaso desarrollo formando pequeños manchones de tipo matorral de escaso tamaño.
- El proceso de clasificación de cuatro categorías de manglar, con características espectrales que fueron asociadas a tipos estructurales específicos, representativos de manglar con vigor y biomasa vegetal que van de mayor a menor desarrollo, permitió definir grupos que presentaron estructura forestal similar, independientemente de su ubicación geográfica, pero los resultados no son definitivos para considerar que existe una clara relación entre estructura forestal e información espectral.

- Los cambios detectados en la extensión de los sistemas de manglar del estado señalan una pérdida cercana a las 4,000 hectáreas con respecto a la extensión total reportada para 1973, lo que indica una disminución menor al 1% en un periodo cercano a treinta años.
- Se concluye que los manglares de Sinaloa están conformados por sistemas heterogéneos, con diversos grados de desarrollo, que varían tanto en la composición y abundancia proporcional de sus especies, como en área basal y densidad, tanto dentro como entre los sistemas estudiados, observándose que los sistemas que mayores modificaciones han presentado durante el periodo que cubre el estudio, se encuentran al sur (sistema Teacapán-Agua Grande) y al centro (Ceuta) de Sinaloa.

9. LITERATURA CITADA

- Acosta-Velázquez, J. 2003. Análisis de la condición del bosque de manglar en el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales y sus relaciones a nivel de paisaje. Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., Mazatlán, 88 p.
- Agraz-Hernández, C.M. 1999. Reforestación experimental de manglares en ecosistemas lagunares estuarinos de la costa noroccidental de México. Tesis de Doctorado, UANL, Facultad de Ciencias Biológicas, 128 p.
- Agraz-Hernández, C.M., Flores-Verdugo, F.J. y Calvario-Martínez, O. 2001. Impacto de la camaronicultura en ecosistemas de manglar y medidas de mitigación. En: Páez O.F. (ed.), Camaronicultura y medio ambiente. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Programa Universitario de Alimentos, UNAM, El Colegio de Sinaloa, México. pp. 373-395.
- Aguilar-Manjarrez, J. 1996. Development and evaluation of GIS-based models for planning and management of coastal aquaculture: a case de study in Sinaloa, México. Tesis de Doctorado, Universidad de Stirling, Instituto de Acuacultura, 373 p.
- Aksornkoae, S. 1975. Structure, regeneration and productivity of mangroves in Thailand. Ph. D. Thesis, Michigan State University, 109 p. En: Piyakarnchana, T. 1980. "The Present State of Mangrove Ecosystems in Southeast Asia and the Impact of Pollution". En línea: <http://www.fao.org/docrep/field/003/AB751E/AB751E00.htm#TOC>.
- Alongi, D.M., 2002. Present, state and future of the world's mangrove forest. *Environmental Conservation* 29 (3): 331-349.
- Alonso-Pérez, F., A. Ruiz-Luna, J. Turner, C.A. Berlanga-Robles and G. Mitchelson-Jacob. 2003. Land cover changes and impact of shrimp aquaculture on the landscape in the Ceuta coastal lagoon system, Sinaloa, Mexico. *Ocean and Coastal Management*. 46: 583-600.
- Arenas-Fuentes, V. y Flores-Verdugo, F.J. (Coord.) 1991. Ecología de los manglares, productividad acuática y perfil de las comunidades en ecosistemas lagunares-estuarinos de la costa noroccidental de México. Parte 1: Ensenada de Pabellón, Bahía de Altata y Bahía de Mazatlán. Informe técnico. DGAPA. Clave: IN-202389. 350 p.
- Arreola-Lizárraga, J.A; Flores-Verdugo, F.J. and Ortega-Rubio, A. 2004. Structure and litterfall of an arid mangrove stand on the Gulf of California, Mexico. *Aquatic Botany* 79 (2004) 137–143.
- Berlanga-Robles, C.A. y Ruiz-Luna, A. 1998. Variaciones en el paisaje del sistema de humedales Laguna Grande-Agua Grande-Teacapán, Sinaloa, México. Trabajos en extenso de la IX Reunión Nacional Selper-México, versión en CD, archivo te2.doc, Zacatecas Zac.
- Berlanga-Robles, C. A. 1999. Evaluación de las condiciones actuales y del cambio en los paisajes de humedales de la costa sur de Sinaloa, México: una aproximación con el uso de datos provenientes de sensores remotos. Tesis de Maestría, UNAM, Facultad de Ciencias, 111 p.

- Berlanga-Robles, C.A. y Ruiz-Luna, A. 2002. Land use mapping and change detection in the coastal zone of northwest Mexico using remote sensing techniques. *Journal of Coastal Research*, 18 (3), 514-522. West Palm Beach (Florida) ISSN 0749-0208.
- Berlanga-Robles, C.A., Acosta-Velázquez, J., Ruiz-Luna, A. y Trelles, N.A., 2004. Caracterización de los patrones espaciales del paisaje y bosque de manglar del sistema lagunar teacapán-agua brava, México a partir del análisis de imágenes landsat etm+ del 2000. XIV Congreso Nacional Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.FEMISCA, ADIS Y Gobierno del Estado de Sinaloa. (Extenso: 177.doc). 12 al 14 de Mayo, 2004. Mazatlán, Sinaloa.
- Berlanga-Robles, C.A., Ruiz-Luna, A., Covarrubias-Lagaspi, H.O. y Ventura-Leonardo, A. 2005. Cambios en los patrones de ecurrimientos en la cuenca Lechuguilla-ohuira-Navachiste, México. 6ª Semana Geomatica, 8 al 11 de febrero, 2005. Barcelona, España. Versión electrónica. Doc S08.
- Biña, R.T., Jara, R.B. y Roque, C.R. 1980. Application of multilevel remote sensing survey to mangrove forest resource management in the Philippines. *Proceedings of the Asian Symposium on Mangrove Development, research and Management*. University of Malaya, Malasia.
- Bocco, V.G., Palacio, J.L. y Valenzuela, R. 1991. Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. *ITC Journal* 4: 309-318.
- Bojórquez-Leyva, A. 2002. Crecimiento, productividad y estructura forestal de manglares en un ecosistema lagunar eutrificado (Estero de Urías) y en estanques experimentales. Tesis de Maestría, UNAM, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, 65 p.
- Boyd C.E. y J.W. Clay., 1998., Acuicultura de camarones y ambiente. *Investigación y Ciencia* (edición en español de Scientific American). 263:22-29
- Campbell, J.B. 1996. *introduction to remote sensing*. 2a. edición, Taylor and Francis, Londres, 622 p.
- Carrera, E. y de la Fuente, G. 2003. *Inventario y Clasificación de Humedales en México*. Parte 1. Ducks Unlimited de México, A.C. México, 239 p.
- Cintrón-Malero, G. y Schaeffer-Novelli, Y. 1984. Methods for studyng mangrove structure, p. 91-130 In: Snedaker, S. y Snedaker, J. (eds). *Mangrove ecosystems: research methods*. UNESCO, Monogr. Oceanogr. Methods. 8: 251 p.
- Cole, T.G., Ewel, K.C. y Devoe, N.N. 1999. Structure of mangrove trees and forest in Micronesia. *Forest Ecology and Management* 117:95-109.
- Congalton, R.G. y Green, K. 1999. *Assessing the accuracy of remote sensing data: Principles and practices*. Lewis publisher. US 137 p.
- Contreras-Espinosa, F. 1993. *Ecosistemas Costeros Mexicanos*, 1ª edición. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Universidad Autónoma Metropolitana. México. 415 p.

- Corella-Justavino, F; Valdez-Hernández, J.I; Cetina-Alcalá, V. M; González-Cossio, F.V; Trinidad-Santos, A. y Aguirre-Rivera, J.R. 2004. Estructura forestal de un bosque de mangles en el noreste del estado de Tabasco, México. *Ciencia Forestal en México*. Vol. 26. Núm. 90
- Cottam, G. y Curtis, J.T. 1956. The use of distance measures in ohytosociological sampling. *Ecology* Vol. 37, 451-460.
- Curtis, J.T. y McIntosh, R.P. 1951. An upland forest continuum in the praire-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32:476-479.
- Chapman, V.J. 1970. Mangrove Phytosociology. *Tropical Ecology*. No. 5:1-19.
- Chuvieco, E. 1996. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 3ª edición. Rialp, Madrid, 568 p.
- Chuvieco, E. y Congalton, R.G. 1988. Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data. *Geocarto International*, (3) 41-53
- Day, J.W., Cvonner, W.H., Ley-lou, F., Day, R.H. y Machado-Navarro, A. 1987. The productivity and composition of mangrove forest. *Laguna de Términos, México. Aquatic Botany* 27:267-284.
- De la Lanza, G., Ramírez, P., Thomas, Y. y Alcántara, R. 1993. La vegetación de manglar en la laguna de Términos, Campeche. *Evaluación preliminar a través de imágenes Landsat. Hidrobiológica* 3: 29-39.
- De la Lanza, G., Sánchez-Santillán, N., Sorani, V. y Bojórquez-Tapia, J.L. 1996. Características geológicas, hidrológicas y del manglar en la planicie costera de Nayarit, México. *Boletín de Investigaciones Geográficas* no. 32. Instituto de geografía UNAM.
- Dimiyati, M., Mizuno, K., Kobayashi, S. y Kitamura, T. 1996. An análisis of land use/cover change using the combination of MSS Landsat and land use map. A case study in Yogyakarta, Indonesia. *International Journal of Remote Sensing*. 17 (5): 931-944.
- Duarte, C.M. y Cebrian, J. 1996. The fat of marine autotrophic production. *Limnology and Oceanography* 41:1758-1766.
- Eastman, J.R. 1995. *IDRISI for WINDOWS. User's guide*. IDRISI Production. Clark University. USA. 120 p.
- Espinoza, M; Sánchez, P. y Muñoz, F. 1981. Valor energético del detritos y algunos aspectos sobre la productividad y degradación de *Rhizophora mangle*, en tres zonas de manglar de la Bahía de La Paz, Baja California Sur. *Informe técnico. Laboratorio Ciencias de Investigaciones Biológicas*:137-179.
- FAO, 2003. Status and trends in mangrove area extent worldwide. By Wilkie, M.L. and Fortuna, S. *Forest Resources Assessment Working Paper No. 63*. Forest Resources Division. FAO, Rome. (Unpublished) <http://www.fao.org/docrep/007/j1533e/j1533e00.HTM>
- FAO, 2005. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005*. México. Informe Nacional. FAO. Roma. Informe nacional 189. 68 p.

- Field, C.D. 1998. Rehabilitation of mangrove ecosystems. An overview. *Marine Pollution Bulletin* Vol. 37, Nos. 8-11, pp. 383-392. Elsevier Science.
- Field, C.D. 1999. Charter for mangroves. En: Yáñez-Arancibia, A., Lara-Domínguez, A.L. (eds.), *Ecosistemas de Manglar en América Tropical*. Instituto de Ecología, A.C., México, UICN/HORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring, MD, USA.
- Flores-Verdugo, F.J. (Coord.), 1986. *Ecología de los manglares y perfil de comunidades en los sistemas lagunares de Agua brava y Marismas Nacionales, Nayarit*. Informe final técnico. Consejo Nacional de Ciencia y tecnología. Clave: PCECBNA-022068. 350 p.
- Flores-Verdugo, F.J., Day Jr. J.W. y Briseño-Dueñas, R. 1987. Structure, litterfall, decomposition and detritus dynamics of mangroves in a Mexican coastal lagoon with an ephemeral inlet. *Marine Ecology Program* 35: 83-90.
- Flores-Verdugo, F.J. 1989. Algunos aspectos sobre la ecología, uso e importancia de los ecosistemas de manglar. Cap. 2: 21-56 En: Rosa-Vélez, J. y González-Farías, F. (eds.) *Temas de oceanografía Biológica en México*. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada 337 pp.
- Flores-Verdugo, F.J., González-Farías, F. y Ramírez-Flores, O. 1990. Mangrove ecology, aquatic primary productivity, and fish community dynamics in the Teacapán-Agua Brava lagoon-Estuarine systems (Mexican Pacific). *Estuaries* vol. 13 2:219-230.
- Flores-Verdugo, F.J., González-Farías, F. y Zaragoza-Araujo, U. 1993. Ecological parameters of the mangroves of semi-arid regions of México: important for ecosystems management. Towards the rational use of high salinity tolerant plants. Vol. 1: 123-132
- Flores-Verdugo, F.J. y Agraz-Hernández, C. 2002. Los ecosistemas de manglar, su importancia económica, ecológica y social. En: A.J. Laborda Navia (ed). *El mar como fuente de moléculas bioactivas*. Secretariado de Publicaciones y Medios Audiovisuales. Universidad de León, España. 51-65 p.
- Garay-Morán, R. 2002. Presupuesto global de la carga de nutrientes que reciben los sistemas lagunares de Sinaloa, como herramienta para la gestión ambiental costera. Tesis de Maestría, ICMYL, UNAM, Mazatlán, Sinaloa, Mex. 228p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geofísica, UNAM.
- González-Zamorano, G.P. 2002. Estructura y análisis espacial de la cobertura del manglar "El Conchalito", B.C.S. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, 87 p.
- Green, E.P., Mumby, P., Edwards, A., and Clark, D. 1996. A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources. *Coastal Management* 24: 1-40.

- Green, E.P., Mumby, P., Clark, D., Edwards, A., Ellis, A.C. 1997. A comparison between satellite and airborne multispectral data for the assessment of mangrove areas in the Eastern Caribbean. Fourth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. Orlando, Florida.
- Green, E.P., Clark, D., Mumby, P., Edwards, A. y Ellis, A.C. 1998. Remote sensing techniques for mangrove mapping. *International Journal of Remote Sensing*. 19, 935-56.
- Green, E.P., Mumby, P., Edwards, A., and Clark, D. 2000. Remote sensing handbook for tropical coastal management. UNESCO Pub. Francia 316 p.
- Green-Ruiz, C.R. 2000. Geoquímica de sedimentos de la laguna costera subtropical Altata-Ensenada Pabellón, Sinaloa, México. Tesis Doctoral. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. G795g
- Gurrola-López, g.H. 2000. Evaluación de los cambios en la cobertura vegetal y uso de suelo del sistema lagunar Bahía Santa María, Sinaloa, México: con aplicación en percepción remota. Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., Mazatlán, 91 p.
- Hamilton, L.S and Snedaker, S.C. 1984. Handbook for mangrove area management. United Nations Environmental Programme and East-West Center, Environmental and Politic Institute. 123 p.
- Hernández-Cornejo, R. y Ruiz-Luna, A. 2000. Development of shrimp farming in the coastal zone of southern Sinaloa (Mexico): operating characteristics, environmental issues, and perspectives. *Ocean & Coastal Management*, 43:597-607
- Hernández-Cornejo, R., Koedam, N., Ruiz-Luna, A., Troell, M., and Dahdouh-Guebas, F. 2005. Remote sensing and ethnobotanical assessment of the mangrove forest changes in the Navachiste-San Ignacio-Macapule lagoon complex, Sinaloa, Mexico. *Ecology and Society* 10(1): 16. URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art16/>
- Herz, R., 1999. Procesamiento digital de imágenes de satélite para el reconocimiento de patrones en os mangles p. 83-108. En: Yáñez-Arancibia, A. y Lara-Domínguez, L.A. (eds). Ecosistemas de manglar en América tropical. Instituto de Ecología AC. México UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA 380 p.
- Honculada-Primavera, J., 1993. A critical review of shrimp pond culture in the Philippines. *Reviews on Fishery Science*. 1(2):151-201.
- INEGI, 1999. Análisis estadístico del Estado de Sinaloa. Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática, México.
- INEGI, 2003. Análisis estadístico del Estado de Sinaloa. Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática, México.
- Jensen, J.R. 1986. Introductory digital image procesing. New Jersey, Prentice Hall.
- Jost, L. 1993. Mathematical Appendix. In: Texabama Croton Investigations, Fort Hood. David Steed, ed. DLS Associates, Austin, TX.

- Kovacs, J.M. 1999. Assessing mangrove use at the local scale. *Landscape and Urban Planning* 43 (1999) 201-208.
- Kovacs, J.M., Wang, J. and Blanco-Correa, M. 2001a. Mapping disturbance in a mangrove forest using multi-date Landsat TM imagery. *Environmental Management* 27: 763-776.
- Kovacs, J.M., Blanco-Correa, M. y Flores-Verdugo, F. 2001b. A logistic regresión model of hurricane impacts in a mangrove forest of the Mexican Pacific. *Journal of Coastal Research* 17:30-37.
- Kovacs, J.M.; Flores-Verdugo, F; Wang, J. and Aspden, L.P. 2004. Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. *Aquatic Botany* 80 (2004) 13–22.
- Kovacs, J.M; Wang, J; and Flores-Verdugo, F. 2005. Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 62 (2005) 377–384.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., y Chipman, J. W. (2004). *Remote sensing and image interpretation* (5th ed.). USA John Wiley and Sons Inc.
- Lacerda, L.D. y Schaefer-Novelli, Y. 1999. Mangroves of Latin America: the need for conservation and sustainable utilization, p. 5-8 en: Yáñez-Arancibia, A. y Lara-Domínguez, L.A. (eds). *Ecosistemas de manglar en América tropical*. Instituto de Ecología AC. México UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA 380 p.
- Lankford, R. R. 1977. Coastal Lagoons of Mexico. Their origin and classification. 182- 215. En: Wilwy (Eds). *Estuarine Processes*. Academia Press. New York, 428 p.
- Lieberknecht, L. 2000. Coastal land use and land use changes in Sinaloa, México. An analysis using Landsat MSS and TM imagery. MSc thesis. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., Mazatlán, 138 p.
- Lillesand, T.M., kiefer, R.W. y Chipman, J.W. 2004. *Remote sensing and image interpretation*. 5ta. Edición, Editorial Wiley. 763 p.
- López-Portillo, J. y Ezcurra, E. 1988. Zonation in mangrove and salt marsh vegetation at Laguna de Mecoacán, México. *Biotropica* 21(2): 107-114.
- López-Portillo, J. y Ezcurra, E. 2002. Los manglares de México: Una revisión. *Madera y Bosques*. Numero especial: 27-51
- Lugo, A.E., Sell, M. y Snedaker, C. 1976. Mangrove ecosystem analysis. En: B.C. Patten (Ed.). *Systems analysis and simulation in ecology*. Vol. 4, pp. 113-145. Academy press, New York. 593 pp.
- Manassrisuksi, K., Weir, M. y Husin, Y.A. 2001. Assesment of a mangrove rehabilitation programme using remote sensing and GIS: a case study of Amphur Khlung, Chantaburi province, Eastern Thailand. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. 5-9 nov 2001. Singapore.

- Manson F.J., Loneragan, N.R., McLeod, I.M., y Kenyon, R.A. 2001. Assessing techniques for estimating the extent of mangroves: topographic maps, aerial photographs and Landsat TM images. *Marine freshwater Research*. 52:787-92.
- Manson, F.N., Loneragan, N.R. y Phinn, S.R. 2003. Spatial and temporal variation in distribution of mangroves in Moreton Bay, subtropical Australia: a comparison of pattern metrics and change detection analyses based on aerial photographs. *Estuarine, coastal and Shelf Science*, 57:653-666.
- Martínez-Santos, A.R. 2003. Estudio sobre el uso del suelo en las subcuencas Bahía Navachiste y Río Sinaloa al norte de México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., 94 p.
- Marshall, N. 1994. Mangrove conservation in relation to overall environmental consideration. *Hidrobiología* 285: 303-309.
- Mas, J.F. 1997. Monitoring land cover changes in the Terminos lagoon region, México: A comparison of change detection techniques. *Proceedings of the IV International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environment*. Orlando, Florida 1: 159-167.
- McGill, J.T. 1969. Coastal classification maps. Pp. 1-22. In: Russell, R.J. (ed.) *Second Coastal Geography Conference*. Coastal Studies Institute, Louisiana State university, Baton Rouge.
- Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G.. 2000. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics* 35:25-33.
- Montes-Cartas, C.G., Castillo-Argüero, S. y López-Portillo, J. 1999. Distribución del manglar en cuatro sistemas lagunares en la costa de Chiapas, México. *Boletín Sociedad Botánica de México*. 64: 25-34.
- Nath, S.S., Bolte, J.P., Lindsay, G.R. y Aguilar-Manjarrez, J. 2000. Applications of geographical information systems (GIS) for spatial decision support in aquaculture. *Aquaculture engineering* 23: 233-278.
- Odum, W.E, McIvor, C.C. y Smith, T.J. 1982. The ecology of mangroves of south Florida: A community profile. *Biological Service Program, U.S. Department of the Interior*. FWS/OBS-81/24, 144 pp.
- Oijma, D.S., Galvin, K.A. y Turner II, B.L. 1994. The global impact of land-use change. *BioScience*, 44,5: 300-304.
- Olea, R.H. 1975. *Ecología descriptiva de Sinaloa*. Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística. México 201 p.
- Ong, J.E. 1982. Mangroves and aquaculture in Malaysia. *Ambio* 11: 252-257.
- Palaganas, V.P. 1992. Assessing changes in mangrove forest of Infanta-Real, Quezon Province (Philippines) using remote sensing. *University of Newcastle* 106 p.

- Patterson, S.G. y Rehder, J.B. 1985. An assessment of conversion and loss of mangroves using remote sensing imagery on Marco Island, Florida. Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, (Reston, Virginia: ASPRS), 728-735 pp.
- Pérez, C.M.S. y Pérez, G.M.R. 1991. Evaluación de los manglares de Celestún con imágenes TM. México: Instituto Nacional de Geografía e Informática, Technical Report INEGI/DGG/STDG (México) Report 6p.
- Pool, D.J., Snedaker, S.C. y Lugo, A.E. 1977. Structure of mangrove forest in Florida, Puerto Rico, Mexico and Costa Rica, BIOTROPICA 9, 3:195-212.
- Ramírez-García, P., López-Blanco, J. y Ocaña, D. 1998. Mangrove vegetation assessment in the Santiago River Mouth, Mexico by means of supervised classification using Landsat TM imagery. Forest Ecology and Management 105:217-229.
- Ramírez-Zavala, J.R. 1998. Estimación de las tendencias de cambio ambiental en el estero de Urías, Sinaloa, México por medio de un análisis multitemporal (1973-1997) con imágenes Landsat. Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., Mazatlán, 85 p.
- Rico-Gray, P. 1981. Presencia del manglar rojo *Rhizophora harrisonii* en las costas de Chiapas. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 21: 163-164.
- Rodelli, M.R., Gearing, P.J., Marshall, N., y Sasekumar, A. 1984. Stable isotope ratio as a tracer of mangrove carbon in Malaysian ecosystems. Oecologia 61: 326-333.
- Ruiz, L.A. y Berlanga R.C.A. 2001. El potencial de la camaronicultura para transformar el paisaje en la zona costera. El sur de Sinaloa como caso de estudio. En: Paez O.F. (ed.) Camaronicultura y medio ambiente. PUAL-ICMYL- El Colegio de Sinaloa. México. Pp. 328-348.
- Ruiz, L.A. y Berlanga R.C.A. 2003. Los sistemas de producción camaronícola en Sinaloa. En: Cifuentes L.J.L. y Gaxiola L.J. (eds.). Atlas de los Ecosistemas de Sinaloa. El Colegio de Sinaloa. México. Pp. 407-415
- Ruiz-Luna, A. y Berlanga, R.C.A. 1998. Detección de cambios en el paisaje costero de Mazatlán, Sinaloa, asociados al crecimiento urbano. Memorias del V Congreso interamericano sobre Medio Ambiente, versión digital, archivo 5-04-0.doc, La Habana, Cuba.
- Ruiz-Luna, A. y Berlanga, R.C.A. 1999a. Caracterización de la costa sur de Sinaloa, México, por medio de percepción remota y el uso de indicadores del paisaje. X Reunión Nacional SELPER-MÉXICO '99. Guanajuato. Noviembre 1999. Versión electrónica. Doc. 11.
- Ruiz-Luna, A. y Berlanga-Robles, C.A.. 1999b. Modifications in cover patterns and land use around the Huizache-Caimanero lagoon System, Sinaloa, Mexico: a multi-temporal analysis using LANDSAT images. Estuarine, Coastal and Shelf Science 49: 37-44.
- Ruiz-Luna, A. y Berlanga-Robles, C.A. 2003. Land use, land cover changes and coastal lagoon surface reduction associated with urban growth in northwest Mexico. Landscape Ecology 18: 159-171.

- Ruiz-Luna, A, Acosta-Velázquez, J., Flores-Verdugo, F., Berlanga-Robles, C. A., Trelles-Rios, N. A. y Monzalvo-Santos, K. 2004. Aplicación de técnicas de percepción remota para el análisis de la distribución, extensión y estructura de sistemas de manglar en Baja California Sur, México. XI Simposio Latinoamericano sobre Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial. 22 al 26 de Noviembre, 2004, Santiago, Chile. (Extenso ARuiz.doc).
- Ruiz-Luna, A., Acosta-Velázquez, J., Monzalvo-Santos, I.K. y Berlanga-Robles, C.A. 2005. Evaluación de la cobertura de manglar, estructura forestal y determinación del impacto potencial por el establecimiento de granjas camaronícolas. Inf. Final. CIAD. Instituto Sinaloense de Acuicultura. 63 p. México.
- Sabins, F. F. 1996. Remote sensing principles and interpretation. 3a. edición, WH freeman and Company, Nueva York, 493 p.
- Snedaker, S. y Getter, C.D. 1985. Pautas para el manejo de los recursos costeros. National Park Service U.S. Department of the Interior and U.S. Agency for International Development, North California. <
- Stiling, P. 1999. Ecology; theories and applications. 3er. edición. Prentice Hall, New Jersey, USA 840 p.
- Suman, D.O. 1994. Situación de los manglares en América Latina y la cuenca del Caribe. En: Suman, D.O. (ed.) El ecosistema de manglar en América Latina y la cuenca del Caribe: Su manejo y conservación. Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science. Universidad de Miami, Florida.
- Tam, F.Y., Wong, Y.S., Lu, C.Y. y Berry, R. 1997. Mapping and characterization of mangrove plant communities in Hong Kong. *Hidrobiologia*, 352: 25-37.
- Thorhaug, A. 1987. Restoration of mangroves and seagrasses and attendant economic benefits for fisheries and mariculture: Management, Policy and Planning. In: Papers contributed to the workshop on strategies for the management of fisheries and aquaculture in mangrove ecosystems. FAO Fisheries Report No. 370 Supplement. Bangkok, Thailand, 23-25 junio 1986. 142-159 p.
- Tiner, E. 1984. Wetlands of the United States: Current status and recent trends. US Fish and Wildlife Service. Washington, DC.
- Tomlinson, P.B, 1986. The Botany of mangroves. 1ª. Ed. Cambridge University. Press USA 419 p.
- Tovilla, H.C. y Loa, 1991. Manglares y marismas, modificaciones debido a los cambios en el uso del suelo, en la costa del estado de Chiapas durante 40 años. Memorias I Congreso Latinoamericano de Administración de la Zona Costera, 13-15 marzo, Ensenada, Baja California, México. En: Tovilla, H.C. 1994. Mangles. En: De la Lanza E.G. y Cáceres, C.M. (eds.) Lagunas costeras y el litoral mexicano. Universidad de Baja California Sur. p:371-423.
- Tovilla, H.C. 1994. Mangles. En: De la Lanza E.G. y Cáceres, C.M. (eds.) Lagunas costeras y el litoral mexicano. Universidad de Baja California Sur. p:371-423.

- Trelles-Ríos, N.A. 2002. Caracterización del paisaje del municipio de Ahome, Sinaloa, México, utilizando técnicas de Percepción Remota y Sistemas de información Geográfica. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. 97 p.
- Valdez-Hernández, J.I., 2002. Aprovechamiento forestal de manglares en el estado de Nayarit, costa Pacífica de México. *Madera y Bosques*. Número especial. 129-145.
- Valiela, I., Bowen, J.L. y Cork, J.K. 2001. Mangrove forest: one of the world's threatened major tropical environments. *BioScience* 51, 10:807-815.
- Yáñez-Arancibia, A., Lara-Dominguez, A.L., Zapata, G.J.V., Arriaga, E.R. y Seijo, J.C. 1993. Mangrove ecosystems of Mexico: Ecological function, economic value, and sustainable development.
- Wafar, S., Untawale, A.G. y Wafar, M. 1997. Litter fall and energy flux in a mangrove ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 44, 111-124
- Wang, L., Sousa, W.P., Gong, P. y Biging, G.S. 2004. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment* 91 (2004) 432-440

ⁱ Valdez Hernández, Juan Ignacio. Colegio de Posgraduados. Chapingo.