



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DE CAMBIO EN LA COBERTURA ESPACIAL DEL MANGLAR EN EL  
ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA LAGUNA DE TÉRMINOS**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO GEOMÁTICO**

**P R E S E N T A :**

**ALEXIS MARIANA HERNÁNDEZ COVARRUBIAS  
DAVID EMMANUEL GARCÍA SOLIS**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**ING. ERIK MÁRQUEZ GARCÍA**

**MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2014**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente:

Secretario:

Vocal:

1er. Suplente:

2do. Suplente:

## **Lugar donde se realizó la tesis:**

Ciudad Universitaria UNAM.

## **TUTOR DE LA TESIS**

ING. ERICK MARQUEZ

---

**FIRMA**



## AGRADECIMIENTOS

### **Alexis Mariana**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de ser alguien, académica, social y moralmente. Algún día podré contar a mis hijos que le devolví una parte de lo que me dio.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería, por su labor subestimada de encaminar a los profesionales del país.

A Erick Márquez, por su confianza y paciencia, pero más que nada por su disciplina en el momento en que más se necesitaba.

A los sinodales, por su entusiasmo y oportunas correcciones.

A mis padres, por su apoyo incondicional, confianza y amor. Gracias por enseñarme a no rendirme, a luchar para lograr mis metas y ser siempre una mejor persona.

A mis amigos, en especial a David, Carlos, Vinicio, Miguel, Alejandro, Israel, Fernando y Luis; por su cariño, apoyo y paciencia. Estoy segura que nadie tendrá mejores amigos que los que yo tuve.

A mis hermanas, por su comprensión y apoyo, también porque siempre han creído en mí.

### **David Emmanuel**

A mis padres y hermanos por todo el amor y apoyo brindado, les agradezco la ayuda que me dieron para lograr esta meta.

A mis amigos, por su amistad y confianza, especialmente a Alexis Covarrubias, Víctor Avilés, Erick Ordoñez, Erik Rosas, y como olvidar a todos mis amigos del punto "Geonini", en cada uno hay una persona especial.

A mis profesores por compartir conmigo en cada clase sus conocimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de terminar mis estudios y por la formación académica que he logrado.

A todas aquellas personas, que sin dudarlo, me han apoyado en todo momento.

**INDICE**

<b>1.INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>3. MARCO TEORICO.....</b>	<b>5</b>
3.1 MANGLAR.....	5
3.2 FUNCIONES DE LOS MANGLARES .....	6
3.3 TIPOS DE MANGLAR EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	6
3.4 MANGLE EN MÉXICO: .....	8
3.5 DETERMIACION DE COBERTURA DE MANGLAR CON PERCEPCION REMOTA .....	11
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
4.1 OBJETIVO GENERAL: .....	13
El objetivo de este trabajo es estimar la cobertura espacial actual del manglar en la Laguna de Términos, así como evaluar los cambios en su extensión, sufridos en un periodo de 20 años, aplicando técnicas de percepción remota. ....	13
4.2 OBJETIVO PARTICULAR: .....	13
<b>5. ANTECEDENTES GENERALES. ....</b>	<b>14</b>
<b>6. ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>17</b>
6.1 LOCALIZACIÓN. ....	17
6.2 OROGRAFÍA.....	20
6.3 HIDROGRAFÍA.....	20
6.4 FLORA.....	21
6.5 FAUNA .....	22
6.6 ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA LAGUNA DE TÉRMINOS .....	23
<b>7. FUNDAMENTOS DE PERCEPCION REMOTA .....</b>	<b>32</b>
7.1 FOTOGRAFÍA.....	32
7.2 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. ....	33



7.3 PERCEPCIÓN REMOTA .....	34
7.4 FUNDAMENTOS DE OBSERVACIÓN.....	35
7.5 EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO.....	36
7.6 SENSORES REMOTOS .....	38
7.7 CUALIDADES DE LOS SENSORES. ....	39
RESOLUCION DE UN SENSOR:.....	39
7.7.1 RESOLUCIÓN ESPACIAL .....	39
7.1.2 RESOLUCIÓN ESPECTRAL.....	41
7.7.3RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA.....	42
7.7.4 RESOLUCIÓN TEMPORAL.....	43
7.6 FIRMA ESPECTRAL .....	44
<b>8. FUENTES DE INFORMACIÓN .....</b>	<b>47</b>
8.1 LANDSAT .....	47
8.2 LIDAR.....	50
8.2.1 LIDAR Aéreo .....	51
8.3 SHAPEFILE.....	53
8.4 FOTOGRAFIAS AREAS.....	54
<b>9. ANALISIS E INTERPRETACIÓN.....</b>	<b>56</b>
9.1 CORRECCIONES DE LA IMAGEN. ....	56
9.1.1 Correcciones radiométricas.....	56
9.1.2 Corrección del bandeo de la imagen. ....	57
9.1.3 Corrección atmosférica .....	58
9.1.4 Conversión de DN a parámetros físicos.....	58
9.1.5 Conversión a radiancia espectral. ....	59
9.1.6 Correcciones geometricas.....	62
9.2 CLASIFICACION DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES .....	63
9.2.1 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.....	64



9.2.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	66
9.3 VERIFICACIÓN.....	68
9.4 TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	70
9.5 MATRIZ DE CONFUSIÓN.....	71
9.6 COEFICIENTE KAPPA.....	72
<b>10. MATERIALES Y MÉTODO.....</b>	<b>73</b>
10.1 MATERIALES.....	73
10.1.1Fotografías aéreas.....	74
10.1.2 Cartografía.....	77
10.2 MÉTODO.....	78
<b>11. RESULTADOS.....</b>	<b>84</b>
11.1 MÉTODO SUPERVISADO Y VALIDACIÓN DE LA EXACTITUD.....	84
11.1.1 Fecha uno (1992).....	84
11.1.2 Fecha dos (2000).....	86
11.1.3 Fecha tres (2011).....	88
11.2 ESTIMACIÓN DE LA TASA DE DEFORESTACIÓN DE LA SUPERFICIE DE MANGLAR.....	90
POOM ATASTA.....	94
ISLA DEL CARMEN.....	94
ISLA AGUADA.....	94
SABANCUY.....	94
<b>12. CONCLUSIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>13. REFERENCIAS.....</b>	<b>96</b>



## 1 .INTRODUCCIÓN.

Las aguas de diferentes cuencas llevan diferentes tipos y cantidades de partículas inorgánicas y orgánicas que se depositan a lo largo de trayectoria y al final de su trayectoria en ocasiones se mezclan con las aguas salobres de los estuarios y lagunas costeras y se enriquecen aún más por la mezcla con las aguas costeras marinas traídas por los flujos de las mareas produciendo una alta productividad de la zona costera y, en particular de los bosques de manglar intermareales, donde la producción primaria y secundaria alcanza altos niveles de productividad. La flora y fauna de los manglares, a su vez enriquece los ecosistemas de manglar a través de un intensa reciclaje.

El intercambio de materia y energía entre el ecosistema de manglares y otros ecosistemas es intenso e interrumpido, debido a la alta temperatura y alta intensidad de la luz en las latitudes bajas, donde el bosque de mangle crece a su máximo potencial. Cambios en el sistema remoto, como el deshielo de los sistemas de alta montaña, presas aguas arriba por los ríos que alimentan, los derrames de petróleo en la zona costera, o la reducción de nutrientes debido a la tala, pueden cambiar drásticamente la estructura y función del ecosistema manglar y pueden positivamente (o, más a menudo, negativamente) afectar sistemas adyacentes. El rendimiento y la composición de especies de aguas salobres y las pesquerías costeras suelen ser los más afectados por la degradación de los bosques de manglar (Vannucci, 2004).

Los manglares son utilizados por comunidades locales sin provocar habitualmente intensidades de uso con efectos irreversibles en el área total relevante del medio natural utilizado. Los principales usos tradicionales de los manglares han sido la obtención de alimentos, medicinas, madera y leña; así como la elaboración de carbón y de taninos para curtir pieles. Actualmente los usos tradicionales de los manglares, al igual que el de la mayor parte de los otros humedales del mundo, se han intensificado y, a la vez, han emergido nuevas actividades como son las visitas recreativas, la pesca deportiva, la observación de aves y otras.

Los manglares también han sido degradados por efecto de la contaminación: desechos sólidos urbanos, contaminantes industriales, pesticidas y fertilizantes agrícolas, derrames de petróleo, etc., así como modificaciones a las condiciones hidrológicas.



Las actividades humanas, que difieren de país a país, constituyen la principal amenaza para los manglares. Entre ellas están las relacionadas con el desarrollo urbano, industrial y turístico, así como el desarrollo agrícola, ganadero y acuícola, que compiten por el suelo en donde se asientan los manglares (CONABIO 2008). De acuerdo con el informe más reciente de la FAO en los últimos veinte años del siglo XX se perdió 25% de la superficie de manglares en el mundo.

Los manglares han sido tradicionalmente muy utilizados y explotados en el pasado en la mayoría de los países en los que existen se desconoce el conocimiento de su actual y pasada extensión, condición y uso es esencial para el gestor forestal. La planificación de la gestión forestal sostenible en los planos locales y nacionales depende en gran medida de esta información, y la falta de datos sobre el estado y la distribución de los manglares dificulta la preparación de planes exitosos para su conservación. El control regular es necesario y no solo contribuye a su conservación, sino también para el uso sostenible de los manglares como fuente de madera, alimentos, ingresos y áreas recreativas para las generaciones presentes y futuras.

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).

El presente trabajo está enfocado a poder determinar las extensiones de manglar a través de métodos geomáticos, de percepción remota y fotogrametría, como una herramienta en el conocimiento de la distribución espacial de este recurso.



## 2. JUSTIFICACIÓN

Los manglares representan un tipo de vegetación único, que crece en la zona intermareal de regiones tropicales y subtropicales y que en México se encuentra bien representado en todas las costas, siendo el Golfo de California el límite norte de la distribución latitudinal en el Pacífico oriental. Por su elevada productividad y sus características estructurales ofrecen una gran diversidad de ambientes y servicios.

De manera particular, el ecosistema de manglar y la zona de vegetación acuática de la región de la Laguna de Términos, así como de la Laguna del Vapor, se han identificado como ecosistemas críticos para ser protegidos y monitoreados no sólo por su valor ecológico sino por su valor económico para las pesquerías costeras de escama adyacentes a la Laguna de Términos; ésta es el área camaronera más importante del Golfo de México en el país. La permanencia de este ecosistema garantiza el mantenimiento de la calidad de las aguas que desembocan en él, protege y conserva la línea de costa contra procesos de erosión y fenómenos meteorológicos y contribuye al mantenimiento de microclimas. Además, protege especies amenazadas (a diferentes niveles) como son: el manatí, la cigüeña, el cocodrilo, el venado cola blanca, las tortugas marinas, los delfines, los monos y el mapache.

La interacción manglar-pastos marinos que se desarrolla en el litoral interno de la Isla del Carmen y en la zona sureste es de importancia básica para la trama trófica del ecosistema lagunar. La Laguna de Términos es área de crianza, alimentación y crecimiento de postlarvas y juveniles del camarón blanco y del camarón café.

Se han sufrido grandes cambios en la zona de estudio, gracias al conocimiento previo de la estructura del manglar y la geomorfología estas nos proporcionan la información necesaria para poder identificar de una forma más fácil y exacta los cambios sufridos en la misma. La regeneración que se ha empleado no cubre el área total de la deforestación que cada vez es más consecutiva.



## .2. JUSTIFICACIÓN

Debido a estos cambios, es indispensable realizar estudios de las causas, consecuencias y variación espacial y temporal del área cubierta por los manglares, la cual nos permita una mejor planeación para conservar, restaurar y manejar nuestros diversos y abundantes recursos naturales.

La finalidad de los procesos de restauración del manglar es imitar la estructura, función, diversidad y dinámica del ecosistema. En este contexto, no todos los sistemas son susceptibles de ser restaurados naturalmente, ya que muchos han sobrepasado ciertos límites ecológicos en términos de productividad, diversidad, habitabilidad y potencial evolutivo.

Las especies de mangle están protegidas por la Norma Oficial Mexicana 059, por lo que diversos infractores que han destruido zonas de manglar han sido obligados a desarrollar proyectos de reforestación con manglares o a restaurar estos ecosistemas en sitios cercanos (compensación ecológica). Como ejemplos se tienen los casos de diversos desarrollos turísticos en Quintana Roo y otros sitios del Pacífico y Golfo de California (Agraz-Hernández, 1999).



## 3. MARCO TEORICO

### 3.1 MANGLAR

Los manglares son bosques costeros que se encuentran en estuarios protegidos, riberas de los ríos y lagunas en los trópicos y subtrópicos. El término "manglar" se utiliza comúnmente para identificar los árboles y arbustos que han desarrollado adaptaciones morfológicas a este ambiente de marea (raíces aéreas, glándulas de excreción de sal y semillas vivíparas), así como el propio ecosistema (FAO, 2007). Estas comunidades vegetales pueden formar desde conglomerados aislados de poca altura (3m), hasta grandes extensiones boscosas con alturas de 25 a 30m y en algunos casos hasta de 50m. El manglar es fácil de diferenciar por la presencia de ciertos caracteres distintivos.

Las características básicas del ecosistema de manglar son:

- Crecen y resisten ambientes con mucha sal y de poco oxígeno.
- Tienen ramas apoyadas en muchas raíces aéreas (que están fuera o dentro del terreno).
- Los manglares más productivos se desarrollan en estuarios con lodo (fango) fino con un alto contenido de materia orgánica.
- Crecen en zonas calientes con una temperatura de más de 68 grados Fahrenheit, o sea, en zonas tropicales y subtropicales del mundo.
- Los manglares generalmente se desarrollan donde tienen protección contra las olas del mar y contra los vientos y las mareas fuertes.
- Pueden respirar en terrenos con poco oxígeno.



Pueden filtrar la sal y botarla fuera de su sistema. Los mangles prosperan en costas protegidas con sedimentos finos donde la temperatura promedio del mes más frío es mayor que 20°C. Muchos factores influyen en el desarrollo de los manglares incluyendo componentes del suelos, hidrográficos, químicos, geológicos, estocásticos (del azar), y biológicos.

La vegetación de manglar incluye diversas formas funcionales, que incluyen árboles y arbustos y en algunas ocasiones palmas y helechos terrestres y epifitos.

### **3.2 FUNCIONES DE LOS MANGLARES**

Los manglares desempeñan una función clave en la protección de las costas contra la erosión eólica y por oleaje. Poseen una alta productividad, alojan gran cantidad de organismos acuáticos, anfibios y terrestres; son hábitat de los estadios juveniles de cientos de especies de peces, moluscos y crustáceos y por ende desempeñan un papel fundamental en las pesquerías litorales y de la plataforma continental. Son hábitat temporal de muchas especies de aves migratorias septentrionales y meridionales. Representan un recurso insustituible en la industria de la madera (maderas pesadas, de gran longitud, de fibra larga y resistentes a la humedad) y de los taninos empleados en curtimbres y tintorería.

Los manglares son un paliativo contra posibles cambios climáticos no sólo por ser fijadores de CO<sub>2</sub>, sino además porque el manglar inmoviliza grandes cantidades de sedimentos ricos en materia orgánica. También mediante este mecanismo, los manglares atrapan contaminantes (compuestos orgánicos tóxicos persistentes y metales pesados). Se estima que por cada especie de manglar destruida se pierden anualmente 767 kg de especies marítimas de importancia comercial.

### **3.3 TIPOS DE MANGLAR EN LA ZONA DE ESTUDIO**

Existen diferentes tipos de divisiones y subdivisiones de manglares de acuerdo a su posición geográfica, Lugo y Snedaker (1974) propusieron la siguiente clasificación:

**Ribereño:** Se establecen en la porción estuarina de los ríos, donde el agua salada se mezcla con el agua dulce por ello la salinidad es mucho mayor que la del mar. Reciben gran cantidad de nutrientes y minerales, lo que se traduce en una mayor producción de biomasa y altura.



**Inundado:** Son típicos de llanos de mareas e islas completamente inundados. En estos bosques se pueden encontrar todas las especies pero por lo general su altura no supera los 5 metros.

**Manglar de Franja (Borde):** Aquellos que bordean el litoral de la península, ya sea que colinden directamente con el mar o bien, que se localizan en la parte interior de lagunas costeras. Sus regímenes hidrológicos suelen ser sumamente dinámicos, y son afectados por las mareas diarias. Sin embargo, también suelen recibir influencia de las aguas de la cuenca inundable, sobre todo en la época lluviosa.

Alcanzan un buen desarrollo estructural, reflejado en su altura y densidad arbórea, que generalmente es mayor que los manglares de cuenca, por lo que confirma como una franja bien definida. Dentro de esta categoría existen otras divisiones:

**Manglar de franja marino:** Se desarrolla sobre la línea costera en aquellos sitios donde no se presentan dunas, tanto en la posición continental de la península como en las islas aledañas. Tiene una influencia directa al agua de mar, ya que está expuesto a su salinidad, al oleaje y mareas.

**Manglar de franja lagunar:** Se encuentra bordeando los litorales de las lagunas costeras o arias a lo largo de toda la costa de la península, Se ha diferenciado del manglar de franja costero, porque está sujeto a procesos hidrológicos esturinos, bajo la influencia del agua dulce o sobre la parte interna de las cuencas inundables.

**Manglar de cuenca:** Son manglares que se establecen en cuencas inundables y que se ubican en la parte posterior de los manglares de franja. Se encuentran en depresiones topográficas de poco flujo y reflujo de aguas

**Manglar de Ciénega baja:** Es aquel que ocupa las partes más bajas de la cuenca, situadas en la parte aledaña a la barra costera. Suele formar islotes arbóreos en las Ciénegas, que se inundan o se secan de acuerdo al régimen hidrológico de estas. Permanece inundado la mayor parte del año sobre todo en la época lluviosa debido a su ubicación este tipo de manglares se ven afectados por las alteraciones ocasionadas con la construcción de caminos y obras portuarias que interrumpen la circulación natural del agua.



Manglar de Lagunas fósiles: Hay lagunas fósiles que han perdido toda comunicación con el mar, están bordadas en su parte oriental, por una barra arenosa que las separa del mar y que presenta vegetación de dunas costeras; por su parte occidental colindan con la selva mediana.

Manglar de Cuenca alta: Este tipo de manglar ocupa las partes más elevadas de los manglares de cuenca, constituyéndose como el borde interno de las zonas de manglar, Se conforma como una comunidad arbórea baja o arbustiva, muy densa, compuesta básicamente por C.Erectus.

Manglar de Salitrales: Se presenta en dos formas principales:

a) Franjas diagonales que se intercalan entre la vegetación de duna costera y los salitrales se desarrolla en sitios intermedios entre las partes elevadas de la duna donde crece vegetación de matorrales y las partes más bajas desprovistas de vegetación.

b) Manglares ocupando aéreas planas que se localizan al margen de las lagunas hiperhalinas, el agua de estas áreas, proviene tanto del mar como de escurrimientos superficiales de las partes más altas de la cuenca.

Manglar Chaparro: Se establece en zonas que presentan severas limitaciones para el crecimiento y desarrollo de los manglares, se desarrolla sobre suelos margosos (roca sedimentaria de calcio y arcilla), con alto contenido de carbonato de calcio, producto en gran medida de la precipitación provocada por la acción de las algas verde-azules.

### **3.4 MANGLE EN MÉXICO:**

México es un país privilegiado por su biodiversidad y se le ubica en el cuarto lugar entre los países mega diversos. El concepto de mega diversidad sólo se aplica a un número muy pequeño de países: aquellos que contienen un porcentaje extraordinario de la biodiversidad del planeta.

Predominan cuatro especies de mangle: mangle rojo, mangle blanco, mangle negro y mangle botoncillo.



A pesar de que los manglares en México están constituidos por pocas especies dominantes debido al factor fuertemente limitante de la salinidad, existe una gran variabilidad en su composición, estructura y función. A nivel local, las características de los manglares se modifican de acuerdo al relieve, el tipo de sustrato, al grado de inundación, a los gradientes ambientales y a las perturbaciones naturales y humanas.

### **Mangle rojo (*Rhizophora mangle*).**

Comúnmente se le conoce con los nombre de mangle rojo, manche colorado, mangle tinto, candelón, tabche, y xtapché entre otros. Es un árbol o arbusto perennifolio, halófito, de 1.5 a 15 m (hasta 30 m) de altura con un diámetro a la altura del pecho de hasta 50 cm. Está compuesto de hojas opuestas, simples, pecioladas, elípticas a oblongas, aglomeradas en las puntas de las ramas, de 8 a 13 cm de largo por 4 a 5.5 cm de ancho, coriáceas, lisas, gruesas; verde oscuras en el haz y amarillentas con puntos negros en el envés. Su tronco es recto. Ramas apoyadas en numerosas raíces aéreas de origen adventicio, simples o ramificadas, con numerosas lenticelas. Su corteza externa de color olivo pálido con manchas grises, pero si se raspa adquiere un color rojo, inodora, amarga, dura, de textura lisa a rugosa y apariencia fibrosa, se desprende fácilmente en escamas. Interna de color rojo intenso, granulosa (con alto contenido de fibras y esclereidas). La corteza forma lenticelas hipertrofiadas en las partes sumergidas de tallos y raíces. Grosor total: 20 a 30 mm.

Habita las costas americanas del océano Pacífico en forma continua, desde el sur de Sonora y Baja California hasta Ecuador, incluyendo el Archipiélago Galápagos. En el océano Atlántico, se presenta en forma discontinua desde las costas de Florida hasta Brasil. Se le encuentra en Bermuda y Bahamas, Antillas Mayores y Menores. En 1902 fue introducida a la isla de Molokai en Hawai y ahora se le encuentra en todas las islas del Archipiélago. Esta especie también está presente en el occidente de África, desde Angola a Mauritania. En América el límite norte de su distribución está casi a los 24° de latitud norte en el Golfo de México y a los 29° N en el Pacífico.

Especie característica de los litorales donde forma a menudo masas puras en las zonas intermareales de lagunas costeras y esteros con influencia de agua salada. Crece en ambientes de continuo movimiento de agua y salinidad variable (hipersalino a salobre). Su mejor desarrollo es en litorales someros, con poca pendiente donde la marea entra con mayor facilidad. Se desarrolla en los sitios protegidos contra la acción del oleaje fuerte. Los manglares más productivos se desarrollan en estuarios con lodo fino, compuesto de cieno, arcilla y alto porcentaje de materia orgánica.



### **Mangle blanco (*Laguncularia racemosa*)**

El mangle blanco se caracteriza por su sistema de raíces de gran tamaño, extendidas y horizontales a partir de las cuales se desarrolla un subsistema de raíces en forma de clavija arriba y debajo de la superficie. Estas raíces tienen forma de maza y en sus cabezas terminales tienen un tejido especial para la ventilación.

El mangle blanco es un arbusto o árbol generalmente pequeño de hasta 20 metros de alto por 60 cm de diámetro. Su tronco es recto con ramas ascendentes, copa redondeada y densa. Las ramas jóvenes son ligeramente aplanadas de color pardo moreno. Su madera no es durable, es medianamente pesada y difícil de trabajar por su tendencia a deformarse y rajarse. Su corteza externa es gris oscura a rojiza y se parte en pequeñas placas. La corteza interna es de color rosa a rojo oscuro, cambia a pardo rojizo y exuda un líquido rojizo. La parte interna del tronco (albura) es de color pardo amarillento o crema rojizo.

Las hojas del mangle blanco son opuestas, elípticas y redondeadas tanto en la base como en el ápice, llegan a medir desde 4 a 10 cm de largo por 2 a 4 cm de ancho; la parte superior de la hoja (haz) es verde oscuro brillante y la parte inferior (envés) es verde amarillento. La base de las hojas (pecíolo) mide de 4 a 15 mm y posee un par de glándulas cerca de la base de la lámina. La hoja tiene numerosas glándulas hundidas en el envés de la lámina que pueden verse fácilmente a contra luz.

### **Mangle negro (*Vicennia germinans*)**

El Mangle negro se diferencia de las otras especies por ser la menos tolerante a la salinidad por lo cual tiene preferencia por las partes costeras más elevadas y alejadas del mar.

El Mangle Negro es un árbol pequeño o arbusto de gran talla, perenne, generalmente de 2 a 8 m de altura, en algunos casos hasta 30 m. Su tronco mide de 20 a 60 cm de diámetro. Sus raíces son superficiales, crecen erectas y saliendo del agua alrededor del tronco principal, y están modificadas (neumatóforos) para permitir la absorción de oxígeno en suelos pantanosos. Su corteza tiene fisuras pequeñas y es rojiza en el interior.



Sus hojas son opuestas y de tamaño variable, entre 3 y 12 cm de largo por 1 a 4 cm de ancho.

La base de las hojas (pecíolo) es gruesa llegando a medir 13 mm. La lámina de la hoja tiene forma de lanza. La textura y apariencia del haz (cara superior) es verde brillante, lisa. El envés (cara inferior) es pálido y presenta muchos pelos diminutos y abundantes.

### **Mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*)**

Árbol o arbusto de hasta 13 mts de altura, de tronco derecho y muy ramificado de color amarillento y de follaje denso; corteza oscura fisurada; las hojas alternas, lanceoladas o elípticas de 3-8 cm de largo por 1.5-3 cm de ancho, coriáceas y levemente carnudas, puntiagudo en ambos extremos, de color verde amarillo en ambas superficies; las flores se dan en los extremos de ramas y en axilas de la hoja y son de color verde-amarillento de pequeñas cabezas, cerca de 5 mm de diámetro en tallos delgados; los frutos son múltiples y redondeados de 10-12 cm de diámetro. Florece todo el año. Especie que se encuentra en sabanas, en petenes y en manglares mezclados con otras especies de mangle.

## **3.5 DETERMINACIÓN DE COBERTURA DE MANGLAR CON PERCEPCIÓN REMOTA**

Para muchos, percepción remota significa satélites y tecnología y el rápido desarrollo de la tecnología en sensores remotos ha provisto la capacidad de generar datos en un rango de lejanía muy grande que ha podido ser analizado y estudiado. De hecho, el desarrollo de sensores, captación de datos y capacidad de almacenamiento de los mismos ha procedido mucho más rápido que sus aplicaciones prácticas.

El objetivo de utilizar los datos de sensores remotos es generar información. Después de esto, cualquier análisis de datos puede realizarse, por lo que, la utilización de la información requerida debe de haber sido definida con anterioridad. Solo así se pueden identificar las mejores técnicas para satisfacer mejor las necesidades.



Algunas técnicas que se han utilizado para el monitoreo de manglares son las siguientes.

- Para conocer los tipos de cobertura vegetal, en especial el manglar en el Corredor Turístico Cancún-Tulum se realizó una interpretación digital por medio del método supervisado, que proporciona una mayor precisión, menor confusión y así como una mejor separación entre las clases de interés. (Lorena Miranda, 2008).
- Debido a la confusión por la similitud de los valores que se presentan en las imágenes de satélite entre los manglares y otros tipos de vegetación (principalmente otros humedales), los datos de las imágenes se seleccionaron aplicando lo que en Percepción Remota recibe el nombre de máscaras, esto quiere decir que solamente se analizaron las porciones de las imágenes con alta probabilidad de presentar cobertura de manglar. (CONABIO 2008)
- A partir del análisis digital de imágenes de satélite LANDSAT MSS de 1973 y 1986, TM de 1990 y 1995 y ETM+ del 2000, de los path/row 31/44 y 31/45 se analizaron las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava por dos vías: un análisis multitemporal pos clasificatorio y la substracción de imágenes de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). (Berlangua-Robles, A Ruiz-Luna)
- Se utilizó el NDVI que facilita la discriminación de la cobertura vegetal de otro tipo de coberturas terrestres y que al mismo tiempo permite conocer la condición de los sistemas estudiados a través de la medición indirecta de su contenido de clorofila y de la biomasa vegetal, aplicándose este método a la evaluación de la cobertura reciente de manglar en el noreste de México. Los valores de NDVI fueron posteriormente reclasificados en cuatro categorías de Tipo 1 representa a manglares de dosel abierto con escaso follaje y bajas concentraciones de clorofila, mientras que el Tipo 4 corresponde a sistemas con dosel cerrado, abundante follaje y elevadas concentraciones de clorofila, siendo los Tipos 2 y 3, situaciones intermedias. (Aimé Cervantes-Escobar)



## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL:**

El objetivo de este trabajo es estimar la cobertura espacial actual del manglar en la Laguna de Términos, así como evaluar los cambios en su extensión, sufridos en un periodo de 20 años, aplicando técnicas de percepción remota.

### **4.2 OBJETIVO PARTICULAR:**

1. Interpretar las imágenes de satélite para su correcta aplicación en el análisis multitemporal.
2. Estimar la cobertura reciente de los sistemas de manglar en El área de protección de flora y fauna Laguna de Términos por medio de clasificación de imágenes LANDSAT de los años 1992,2000 y 2011.
3. Cuantificar el área de pérdida de bosque de manglar por “Sitios de manglar con relevancia Biológica”
4. Estimar los cambios espaciales y temporales en la distribución de manglar a través del análisis comparativo entre las imágenes.



## 5. ANTECEDENTES GENERALES.

La investigación sobre manglares en México tiene un desarrollo alrededor de 40 años. Las publicaciones que pueden considerarse como pioneras son las de Cuatrecasas (1958, primera en México, pero con ejemplos colombianos), Miranda (1958), Sánchez (1963), Thom (1967) y Vázquez (1971). La primera visión general, puesta en el contexto de la vegetación de México, es la de Rzedowski (1978), quien además presenta en su mapa de vegetación de la República Mexicana la distribución de manglares, considerándola parte de la vegetación acuática y subacuática. Un mapa en donde se proporciona una visión general de la distribución de manglares en México es el de Flores et al. (1971); otros mapas son los publicados por Lot y Novelo (1990) por Tovilla (1994), aunque también pueden consultarse las cartas publicadas por DETENAL e INEGI durante las tres décadas anteriores.

La cobertura de manglar en México ha sido estimada en varias fechas, por diferentes métodos y a diversas escalas de detalle. Flores *et al.* (1971) calcularon con base en fotografías aéreas y recorridos de campo la existencia de 142,000 ha en el país, mientras que Loa (1994) calculó una extensión de 488A00 ha, la SARH (1991) de 53,000 ha y Yáñez-Arancibia (1999) de 524,600 ha. Por otra parte, López-Portillo y Ezcurra (2002) mencionan que la superficie oscila entre 0.7 y 0.27% del territorio nacional. El análisis de los datos de Loa (1984) muestra que la costa del Pacífico presenta 59.7% de la cobertura de manglar, mientras que la del Golfo de México y Caribe alcanza 40.3%, siendo los estados con mayor superficie de manglar los siguientes: Nayarit, Campeche, Sinaloa, Yucatán, Chiapas y Tabasco.

Muy pocas instituciones cuentan con investigadores de manglares, pero existe un entusiasta grupo de estudiantes que va en aumento.

La mayoría de estos especialistas pertenecen a instituciones de investigación en México y en ellas realizan proyectos de largo plazo que le han dado continuidad al estudio y conocimiento de los ecosistemas costeros que albergan manglares en los litorales del Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe; se han llevado a cabo numerosos estudios de caso y documentado experiencias específicas de conservación y restauración para distintos tipos de manglares. Además, distintos grupos académicos han interactuado con las comunidades rurales asentadas alrededor de los ecosistemas de manglar aprendiendo junto con ellas a proteger y conservar a los manglares y a potenciar el uso sustentable para su bienestar.



Por su parte, distintas organizaciones no gubernamentales han desarrollado programas de conservación de manglares en el país. A esta tarea se han sumado, entre otras, World Wildlife Fund (WWF), Pronatura, The Nature Conservancy (TNC), Conservation International, Comunidad y Biodiversidad (COBI), Grupo Manglar, Marea Azul, International Fund for Animal Welfare (IFAW), Defenders of Wildlife, etc., las cuales han aportado recursos económicos y esfuerzos institucionales para patrocinar proyectos específicos de conservación de manglares en distintas regiones del país.

El tema de manglares ha estado presente en la agenda del gobierno federal desde hace por lo menos 30 años. Distintas secretarías de estado han patrocinado estudios de manglares para fortalecer sus políticas públicas; SAGARPA, SEMARNAT y SEMAR destacan en dicha tarea. El INE, la CONANAP, la CONABIO y la CONAFOR alientan el estudio y la conservación de los manglares en el marco de sus tareas institucionales.

El Inventario Nacional de Manglares fue elaborado con 134 imágenes multiespectrales del satélite SPOT-5 y dos escenas del satélite LANDSAT-7 ETM. Las imágenes SPOT fueron proporcionadas por la Secretaría de Marina (SEMAR), Estación de Recepción México de la Constelación SPOT (ERMEXS). Las imágenes LANDSAT-7 fueron obtenidas del Global Land Cover Facility de la Universidad de Maryland, estas escenas fueron utilizadas para cubrir sólo el 0.1% del total de manglar que no fue cubierto por imágenes SPOT. Cada imagen SPOT cubre aproximadamente 60 x 60 km de la superficie terrestre, el área mínima de observación es de 10 metros, registrando información en la porción visible e infrarroja del espectro electromagnético. El 82 % de las imágenes SPOT fueron tomadas en los años 2005 y 2006, el resto son del periodo 2003-2007.

Estas imágenes fueron rectificadas geográficamente, tomando como base las ortofotos digitales del INEGI, y corregidas radiométricamente. (CONABIO 2008).

Los gobiernos de los estados también empiezan a participar en los temas de conservación de manglares. En los últimos cinco años se han desarrollado con éxito programas de restauración de manglares patrocinados por los gobiernos de los estados de Sinaloa y Yucatán.



Para conservar un ecosistema es necesario conocerlo. Los manglares han sido estudiados y se siguen estudiando, pero el conocimiento adquirido no se utiliza suficientemente cuando se diseñan los proyectos de desarrollo, ya que quienes los formulan y realizan no utilizan cabalmente la información disponible y en ocasiones prefieren perder manglares a desarrollar proyectos compatibles con el equilibrio ecológico y llevar a cabo acciones que respeten la estructura y función de este ecosistema.

La percepción pública de que estamos perdiendo de manera acelerada estos ecosistemas y no estamos siendo capaces de conservarlos se reafirma con ejemplos tales como una carretera mal trazada, un desarrollo inmobiliario, un puerto, una granja de camarón, o la instalación de torres de alta tensión que se han desarrollado en superficies ocupadas por manglar, fragmentando o destruyendo el ecosistema.

También han hecho falta datos para valorar el estado de conservación de los manglares y conocer sus tendencias de cambio. No se tiene certeza respecto a la superficie que ocupan en México, cómo se distribuyen en cada entidad federativa con litoral, cómo están cambiando, cuál ha sido su tasa de pérdida a lo largo de los años y cuáles son sus principales amenazas (CONABIO 2008).

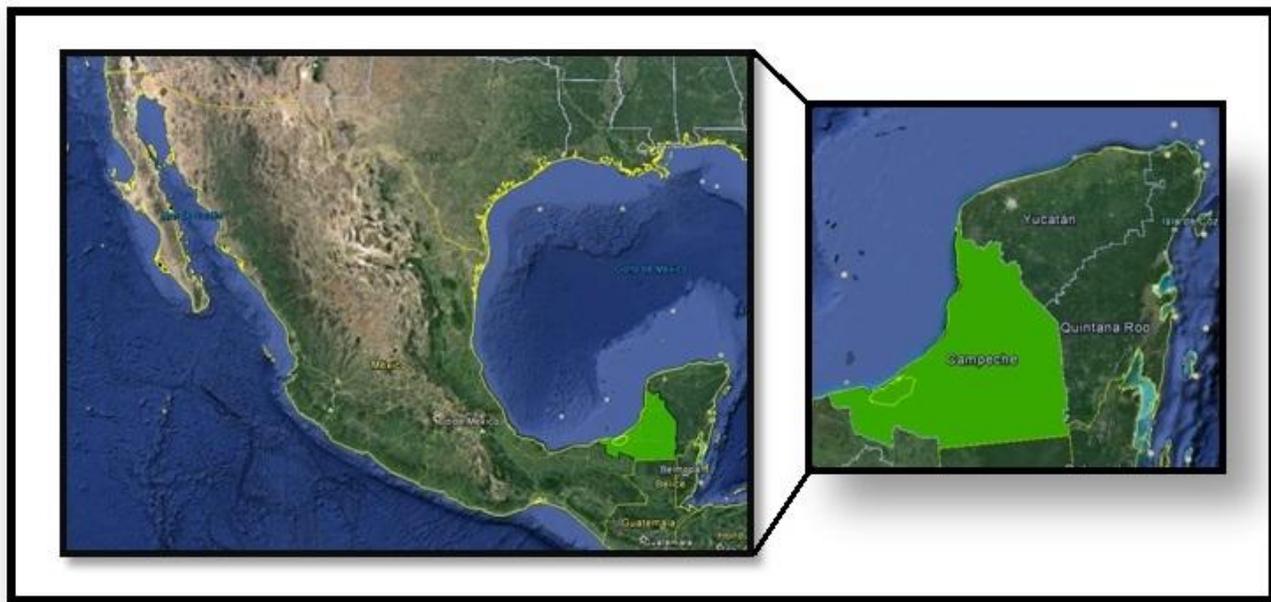
De acuerdo con la FAO, en México, en el año 2000 el manglar ocupaba 440,000 ha (FAO, 2003), cifra que contrasta con lo que reportó SEMARNAT para la misma fecha, cerca de 890,000 ha (SEMARNAT, 2003).



## 6. ÁREA DE ESTUDIO

### 6.1 LOCALIZACIÓN.

El estado de Campeche se extiende entre los paralelos  $17^{\circ} 49'$  y  $20^{\circ} 51'$  de latitud Norte y los meridianos  $89^{\circ} 06'$  y  $92^{\circ} 27'$  de longitud Oeste. Colinda al noreste con el estado de Yucatán, al este con el estado de Quintana Roo, al sureste con Belice, al sur con la República de Guatemala, al suroeste con el estado de Tabasco y al oeste con el golfo de México.



Ubicación del estado de Campeche, México.



## 6. ÁREA DE ESTUDIO

Campeche, con una extensión total de 57.924 km<sup>2</sup>, que representa el 3,0% del territorio nacional, es una de las tres entidades que conforman la península de Yucatán. Su población total, según cifras del Censo de Población y Vivienda 2010, es de 822.441 habitantes. Desde el punto de vista físico, Campeche se encuentra en una posición de transición entre la selva tropical del Petén guatemalteco y la selva baja caducifolia del extremo norte de la península de Yucatán.

Alrededor de 650 mil campechanos viven en el estado, que ocupa una superficie de 50 950 km<sup>2</sup> dividida en once municipios: Calkiní, Calakmul, Campeche, Candelaria, Champotón, El Carmen, Escárcega, Hecelchakán, Hopelchen, Palizada y Tenabo.



Municipios del Estado de Campeche.



El estado cuenta con 3 tipos de climas: Am cálido húmedo con abundante lluvia en verano, A (W) cálido subhúmedo con lluvias en verano y BS1 (h') semiseco cálido. En general, el clima del estado de Campeche es cálido subhúmedo con lluvias en verano y con una precipitación pluvial de 1,300 a 1,500 mm.; el período de lluvias es de junio a octubre. La temperatura media anual es de 27°C; no se presentan heladas, y en cuanto a huracanes, su litoral es el de menor incidencia.

Si bien la importancia de las precipitaciones incide en la actividad agrícola temporalera, su potencialidad radica primordialmente en la recarga de los mantos acuíferos.

Su posición geográfica dentro del trópico, aunada a su vecindad con el golfo de México y el Mar Caribe determinan la presencia de climas cálidos, húmedos y subhúmedos con lluvias en el verano, con temperaturas medias anuales superiores a 22 °C y una precipitación total anual que varía de menos de 1000 milímetros en el norte en parte del área que fisiográficamente corresponde a la provincia denominada “península de Yucatán”, sobre zonas calizas que favorecen la infiltración; hasta cerca de 2000 milímetros en el suroeste en la llanura costera del Golfo Sur, donde por la naturaleza del terreno es mayor, razón por la cual se presenta un gran número de corrientes y depósitos de agua, como los ríos Palizada y Cantería o las lagunas de Atasta y Pom.

La temperatura promedio anual es de 26°C presentándose los niveles máximos antes del solsticio de verano con un promedio de 28°C alcanzándose una temperatura máxima histórica de 43°C.

La temporada de lluvias está comprendida entre los meses de junio a octubre y la de estiaje (ausencia de lluvias), del mes de enero a mediados del mes de mayo.

Los vientos dominantes soplan de noroeste a suroeste por la mañana y al mediodía, durante los meses de noviembre a marzo, y por la noche de noroeste a suroeste la mayor parte del año.

Durante los meses de abril y mayo, los vientos tienden poco a poco a orientarse en dirección norte-sur; para los meses de junio a agosto, los vientos provienen del sureste y para los meses septiembre y octubre, el viento que proviene del norte tiende a alinearse en la dirección este-oeste.



## 6.2 OROGRAFÍA

El relieve del territorio en general, es plano con alturas máximas de 300 metros sobre el nivel del mar; las pendientes varían hasta un máximo de 15%.

El medio físico de Campeche es particularmente favorable para las actividades agropecuarias, forestales y pesqueras. Sus recursos naturales lo sitúan como uno de los más diversos y abundantes de la República Mexicana.

La base continental se formó mediante la continua acumulación de fragmentos finos y gruesos de carbonato de calcio y magnesio de origen marino (calizas, durante los periodos del eoceno y oigoceno). La superficie estatal se considera que está formada por rocas sedimentarias que descansan en formaciones terciarias y que no han recibido movimientos orogénicos notables.

En el sur de Seybaplaya, en el municipio de Champotón se inicia una serie de lomerías conocidas como sierra alta o Puuc, que se dirigen al noreste, hasta Bolonchen y ahí penetran en el estado de Yucatán, tienen una altitud media de entre 40 y 60 metros, llegando a alcanzar en algunos puntos más de 100 metros.

## 6.3 HIDROGRAFÍA

Son cinco los ríos principales que forman parte de las aguas continentales del estado de Campeche, con una extensión de 200 Km<sup>2</sup>. Cuenta además con 4 regiones, 7 cuencas hidrológicas y 2,200 Km<sup>2</sup>. de lagunas costeras, en donde se encuentra una de las principales riquezas naturales de la entidad: la gran variedad de especies marinas.

Como parte de la Región Hidrológica Yucatán-Oeste, El municipio de Campeche carece de corrientes superficiales. Por el contrario, se observa la presencia de grietas en su parte norte y noroeste, por las cuales el agua de la lluvia ha formado cauces subterráneos, sin embargo, tiene cuerpos de agua pequeños en las zonas de Edzná y Hampolol.

El nivel freático se encuentra a profundidades que van de 6m.a 90m y su aprovechamiento agrícola se hace a través de obras de riego; su ubicación en el territorio Estatal, lo hace uno de los municipios con mayores recursos hidrológicos.



Los ríos, lagos, lagunas y esteros sobre el territorio de Campeche abundan en la porción sur y suroeste, mientras que van disminuyendo hacia el norte, debido a la rápida filtración del agua al subsuelo. El sur y suroeste de Campeche se encuentran dominados por un exceso de agua debido al gran número de ríos que atraviesan la zona. Las corrientes de esta área pertenecen a distintas cuencas, la mayor es la del sistema Grijalva-Usumacinta, seguido por las cuencas del río Candelaria, la del río Chumpán y la del río Mamantel.

Del sistema Grijalva-Usumacinta, tenemos al río bajo Usumacinta, un río con tendencia a cambiar de cauce, lo que ha ocasionado que se divida en varios brazos.

Otro rasgo importante es el que conforman las pequeñas lagunas que rodean a la Laguna de Términos, formando en conjunto el sistema de lagunas más importante del país; de oeste a este, tenemos el siguiente orden: de Atasta, Pom, Puerto Rico, el Este, del Vapor, del Corte, Pargos y Panlau.

La formación de estas lagunas ha ocurrido durante los últimos 5 mil años, sobre todo por la acumulación de sedimentación acarreadas por los ríos, lo que ha provocado la formación de barreras arenosas alrededor de las depresiones del terreno. Hacia el nordeste de este sistema tenemos el estero de Sabancuy formado por barreras de arena y manglar.

## **6.4 FLORA**

En la región de la costa existe el mangle, un arbusto con raíces aéreas más abundante en zonas pantanosas. En la región de la sierra existen árboles de madera preciosa como el cedro, el granadillo, la caoba, el pich y el chacáh. También una gran variedad de árboles frutales como el chicozapote de donde se extrae el chicle. Una de las actividades de esta región es el cultivo de maíz, mango y tomate.

La región de la selva es una de las más ricas en flora: caoba, cedro, ciricote, granadillo, pich, palma de huano y ramón. También se encuentra el Palo de Tinte o Palo de Campeche del cual se extrae tintes y que antiguamente se exportaba a España. Además se cultivan plantas con las cuales se condimenta la comida: añil, moral, achiote, romero, perejil, mejorana y vainilla. Abundan los árboles frutales como: mamey, nance, mango, plátano, ciruela, piña, melón y sandía.



En la selva: cedro, caoba, ciricote y achote; frutales, como mamey, zapote, guanábana, pitahaya, uspi, canistel, palmeras y flores. Al norte: la vegetación natural ha sido desplazada por el cultivo del henequén. En la costa: predominan pastizales, tules y manglares.

La Laguna de Términos tiene un amplio mosaico de asociaciones vegetales terrestres y acuáticas tales como vegetación de dunas costeras, manglares, vegetación de pantano, selva baja inundable, palmar inundable, matorral espinoso inundable, matorral inerme inundable, vegetación riparia, selva alta-mediana y vegetación secundaria, además de la vegetación de las fanerógamas permanentemente inundadas como son los pastos marinos.

Todas estas asociaciones han generado una alta diversidad florística. Se registran 84 familias y 374 especies, de las cuales cuatro tiene requerimiento de protección especial, tres especies se encuentran catalogadas como amenazadas (*Bletia purpurea*, *Bravaisia interregina* y *Bravaisia tubiflora*) y una en peligro de extinción (*Habernaria bractescens*).

## 6.5 FAUNA

Habitan pelícanos, garzas, patos y rabohicardos. Hay una gran diversidad de reptiles como lagartijas, serpientes variadas (coralillo, culebras de agua, serpientes de jardín), tortugas e iguanas.

En las aguas habitan gran cantidad de peces como mojarra, sierras, pargos, róbalo; y muchos moluscos principalmente muchas variedades de camarón, jaiba, caracol rojo y negro, cangrejos y pulpos. Además habita una especie de tiburón conocida como cazón. Debido a toda esta variedad de productos, en muchas ciudades, los habitantes tienen como actividades principales la pesca, cría y/o empaque de estas especies.

Hay una diversidad muy grande de animales: venados cola blanca, armadillos, pavos de monte, tuzas, tepezcuintles, serpientes, conejos, y varias especies de aves como la codorniz, perdiz, chachalaca, palomas y pájaros carpinteros. Además hay crianza de abejas (apicultura) y avicultura, de donde se obtiene carne y huevos de gallina.



La selva también es rica en fauna: habitan diversas especies de monos, pumas, jabalíes, venados y una gran diversidad de serpientes. Aves como el faisán, la cacatúa, diversos loros, pavos reales y chachalacas. Hay una gran abundancia de insectos como avispas, abejas y tábanos.

## **6.6 ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA LAGUNA DE TÉRMINOS**

La Laguna de Términos es una laguna costera de México localizada en la costa del Golfo de México, específicamente en el Golfo de Campeche, en el litoral del estado mexicano del mismo nombre, al suroeste de la península de Yucatán.

El nombre de Laguna de Términos se debe a que los españoles que descubrieron la isla del Carmen en 1518 creyeron que la laguna separaba lo que se creía entonces era la Isla de Yucatán de tierra firme. La laguna está alimentada por ríos que contribuyen a la existencia de un importante y rico ecosistema tropical.

Vecina de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, forma parte de la mayor cuenca hidrológica del país. Se trata de un extenso humedal donde los pantanos filtran el agua. Mide 70 km de largo por 40 de ancho aproximadamente.

Dentro de la laguna existen grandes bosques de manglares, que constituyen una efectiva barrera contra las inundaciones, y reducen el impacto de fenómenos meteorológicos como huracanes y tormentas tropicales. Además, el manglar sirve como reservorio de especies -crustáceos y peces-, y es un sitio propicio para la anidación de aves y reptiles.

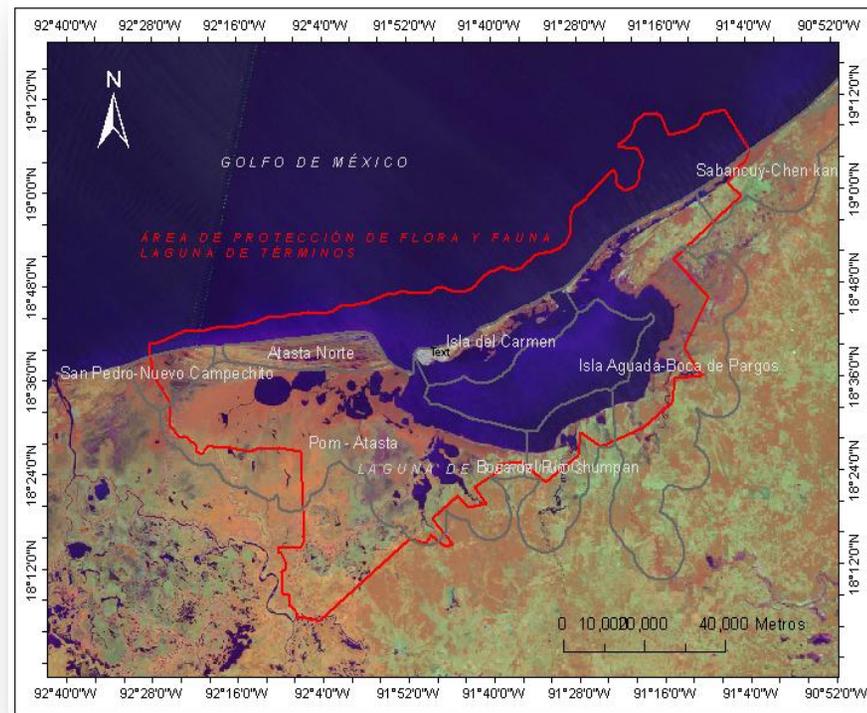
Fue declarada como Área de Protección de Flora y Fauna el 6 de junio de 1994 y cuenta con un área de 704 000 hectáreas aproximadamente, lo que lo convierte en una de las Áreas Naturales Protegidas más grande de México. El 2 de febrero de 2004, esta área ingresó a la lista de sitios Ramsar.

En la laguna desembocan ríos como Palizada, Chumpán y Candelaria, entre otros, y lagunas como las Pom, Atasta, del Corte, San Carlos, del Este, de Balchacah y de Palau. En sus aguas se realiza la pesca de camarón, robalo, mojarra, cazón, ostión y tortugas.



## 6. ÁREA DE ESTUDIO

En el año 2007 se llevó a cabo el “2do Taller de consulta para el programa de monitoreo de los manglares de México.” y la 'Reunión de consulta para la identificación de sitios de manglar de relevancia biológica y sitios con necesidades de rehabilitación ecológica para la Región Península de Yucatán y el estado de Tamaulipas' realizada en septiembre de 2008. Mediante estos, se identificaron los sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica a nivel nacional; a continuación se describen aquellos sitios que se encuentran ubicados dentro del área de estudio.



Límites del área de Estudio (Rojo) y sitios prioritarios de manglar (Gris).



## ATASTA NORTE

Se localiza entre los  $18^{\circ}37'1''$  Y  $18^{\circ}42'1''$  de latitud norte, y los  $91^{\circ}54'18''$  y  $92^{\circ}17'56''$  de longitud oeste. Este sitio de manglar se encuentra al Nor-Oeste del estado de Campeche en el municipio del Carmen.



Sitio prioritario Atasta Norte.



Manglares en la península de Atasta, CONABIO-SEMAR.

Tiene una extensión aproximada de 27028 ha con una cobertura de manglar aproximada de 12800.59 ha con una integridad ecológica funcional del área alta. La importancia de su función como corredor biológico entre aéreas es alto, entre otras cosas presenta fenómenos naturales extraordinarios importantes como son la presencia de huracanes y nortes.

Ha tenido una pérdida bajo en un valor probable de entre 0 y 30%, los cambios en las poblaciones humanas son altos. Se han hecho prácticas de manejo inadecuado sobre todo a los costados de la carretera, así como Rompimientos en la línea de costa (Tapos).



## BOCA DEL RIO CHUMPAN

Se ubica entre los  $18^{\circ}13'40''$  y  $18^{\circ}34'25''$  de latitud norte, y los  $91^{\circ}22'47''$  y  $91^{\circ}36'32''$  de longitud oeste. Este sitio de manglar se encuentra al sur del área de la Laguna de Términos, en el estado de Campeche en el municipio del Carmen.



Sitio prioritario Boca del Río-Chumpan



Manglares de Boca del Río Chumpán, Campeche, CONABIO-SEMAR.

Tiene una superficie aproximada de 54965 ha, con una cobertura de manglar aproximada de 1987 ha. La zona tiene una integridad ecológica funcional de área media, una presencia de fenómenos naturales importantes como son nortes fuertes y avenidas por crecientes del río. Pero no hay presencia de endemismos. Ha tenido una pérdida de superficie original alto ente el 60 a 100% con un grado de fragmentación alta, mientras que el cambio de las poblaciones humanas se ha mantenido estable. Hay un alto manejo inadecuado en la quema para la práctica agrícola y cacería.



## ISLA AGUADA-BOCA DE PARGOS

Localizado entre los  $18^{\circ}10'1''$  y  $18^{\circ}59'46''$  de latitud norte, y los  $91^{\circ}03'55''$  y  $91^{\circ}29'48''$  de longitud oeste. Este sitio de manglar se encuentra al este del Estado de Campeche en los municipios del Carmen, Candelaria y Chapotón.



Sitio prioritario Isla Aguada- Boca de Pargos.



Manglares de Isla Aguada-Boca de Pargos, Campeche, CONABIO-SEMAR.

Cuenta con una extensión de manglar aproximada entre las 29710 ha, el bosque de manglar tiene una integridad ecológica funcional en el área alta, presenta fenómenos naturales extraordinarios como son nortes fuertes y huracanes. La pérdida de la superficie original de manglar ha sido media con un promedio de entre el 30 y el 60% del territorio total puesto que los cambios de densidad en las poblaciones humanas ha sido alto. De la misma forma, la concentración de especies en riesgo es alta así como el manejo inadecuado como la quema para la práctica agrícola y la cacería.



## ISLA DEL CARMEN

Situado entre los  $18^{\circ}35'10''$  y  $18^{\circ}47'31''$  de latitud norte, y los  $91^{\circ}51'06''$  y  $91^{\circ}27'56''$  de longitud oeste. Este sitio de manglar se encuentra al norte del estado de Campeche en el municipio del Carmen.



Sitio prioritario Isla del Carmen.



Manglares de Isla del Carmen. Laguna de términos. Campeche. CONABIO-SEMAR

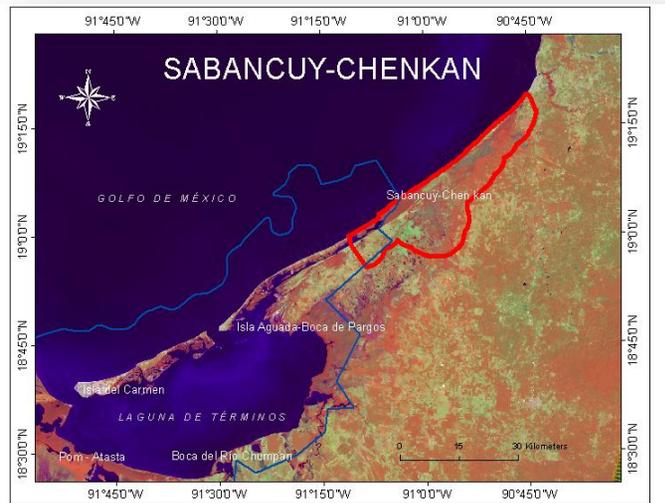
Cuenta con una extensión de manglar aproximada a las 6500 ha, tiene una integridad ecológica funcional en el área media ya que es causada por la interrupción parcial del flujo, mientras que su función como corredor biológico entre áreas es medio, presenta fenómenos naturales extraordinarios como son nortes fuertes y huracanes.

La pérdida de la superficie original de bosque ha sido media con un promedio de entre el 30 y el 60% del territorio total.



## SABANCUY- CHEN KAN

Colindante con Boca de Pardos, está entre los  $18^{\circ}57'19''$  y  $19^{\circ}19'11''$  de latitud norte, y los  $90^{\circ}43'33''$  y  $91^{\circ}11'04''$  de longitud oeste. Se sitúa al Noreste del estado de Campeche, en los municipios de Champotón y Carmen.



Sitio prioritario Sabancuy-Chenkan.



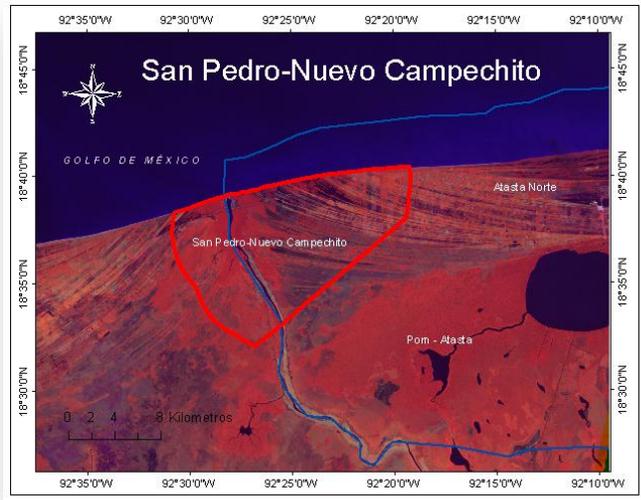
Manglares de Sabancuy-Chen Kain, Campeche, CONABIO-SEMAR.

Cuenta como una extensión de manglar aproximada de 12970 ha por lo que su integridad ecológica funcional del área es baja, la importancia de su función como corredor biológico entre áreas es medio por su fragmentación en el terreno, tiene una importante presencia de fenómenos naturales extraordinarios como nortes fuertes y huracanes. Su riqueza específica es alta. La pérdida respecto al área original es alta entre el 60 al 100% por lo cual su grado de fragmentación es alta, esto ha propiciado que la densidad de poblaciones humanas sea alta.



## SAN PEDRO- NUEVO CAMPECHITO

Se localiza entre los  $18^{\circ}32'01''$  y  $18^{\circ}40'22''$  de latitud norte, y las  $92^{\circ}19'08''$  y  $92^{\circ}30'49''$  longitudes. Se encuentra AL Noroeste del estado de Campeche, en los municipios del Carmen y Centla.



Sitio prioritario San Pedro-Nuevo Campechito.



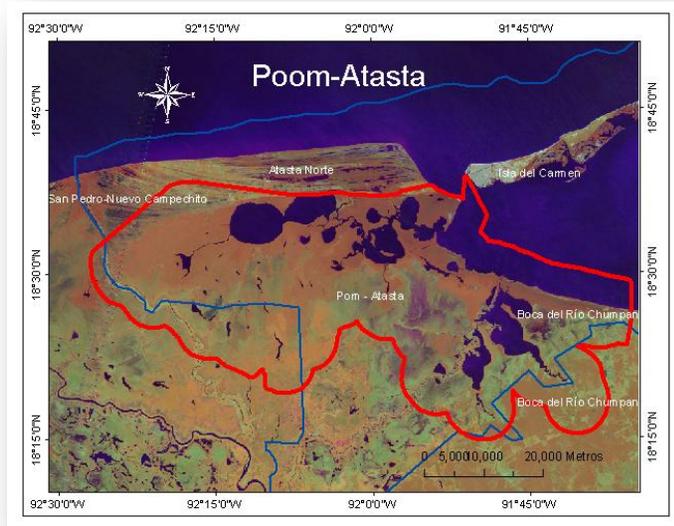
Manglares de San Pedro-Nuevo Campechito, Campeche, CONABIO-SEMAR.

Cuenta con una extensión de manglar aproximada de 2558 ha para lo cual la integridad ecológica funcional del área es media, la importancia de su función como corredor biológico entre áreas es alto, tiene una importante presencia de fenómenos naturales extraordinarios como fuertes. Su riqueza específica es media. Las principales acciones para el sitio son la conservación y rehabilitación, las propuestas para acciones de conservación son la actualización de zonificación de área. Las principales propuestas para las acciones de rehabilitación son estudios de hidrodinámica.



## POOM-ATASTA

Se encuentra entre los paralelos  $18^{\circ}14'4''$  y  $18^{\circ}38'44''$  y los meridianos  $91^{\circ}35'12''$  y  $92^{\circ}26'52''$ , está situado al oeste del estado de Campeche y al este del Estado de Tabasco. Abarca los municipios de Carmen y Palizada en el Estado de Campeche, y Junutá y Centla en el estado de Tabasco. Tiene una superficie aproximada de manglar de 59 300 ha.



Sitio prioritario Pom-Atasta.



Manglares de Pom-Atasta, Campeche, CONABIO-SEMAR.



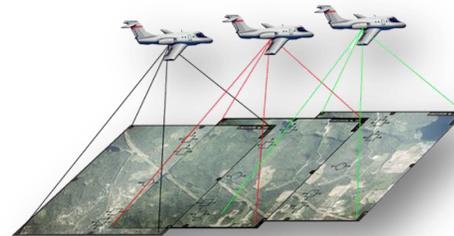
## 7. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

### 7.1 FOTOGRAMETRÍA

La Fotogrametría se define como el proceso de generar información métrica acerca de un objeto a través de mediciones realizadas sobre fotografías, dejando a la fotointerpretación (mediante análisis visual humano) la tarea de obtener información cualitativa (la experiencia humana es un factor determinante).

Con la introducción de tecnologías para la adquisición de imágenes desde el espacio en una amplia región del espectro electromagnético, el significado de Fotogrametría y fotointerpretación se ha extendido comprendiendo percepción remota, moviéndose de la fotointerpretación clásica hacia el uso de imágenes digitales procesadas en adición a la interpretación humana y aplicando análisis por computadora tanto a las imágenes de satélite como a las fotografías aéreas.

Una definición suficiente y ampliamente aceptada de Fotogrametría y percepción remota es la siguiente: Arte, ciencia y tecnología para obtener información válida acerca de objetos físicos y del ambiente, a través de procesos de recolección, medición e interpretación de imágenes (fotografías o digitales) y representación análoga o digital de los modelos de energía electromagnética derivada de sistemas de medición (cámaras fotográficas o sistemas de escaneo), sin tener contacto con los objetos (Gomarasca, 2009).

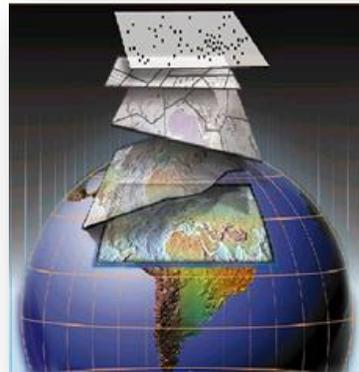


Fotografías aéreas obtenidas a partir de un vuelo fotogramétrico.



## 7.2 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Es una herramienta que permite recopilar, almacenar, integrar, analizar, recuperar a voluntad, transformar, mostrar y distribuir información espacialmente georreferenciada.



Capas temáticas de información, manera en que se organiza un SIG.

Los temas relacionados con el aire, el agua, el suelo y el subsuelo son parte de un sistema único en el que las acciones humanas pueden generar situaciones complejas que requieren una gestión eficiente.

Para ello son necesarias herramientas y servicios para la explotación, planificación, prevención y protección.

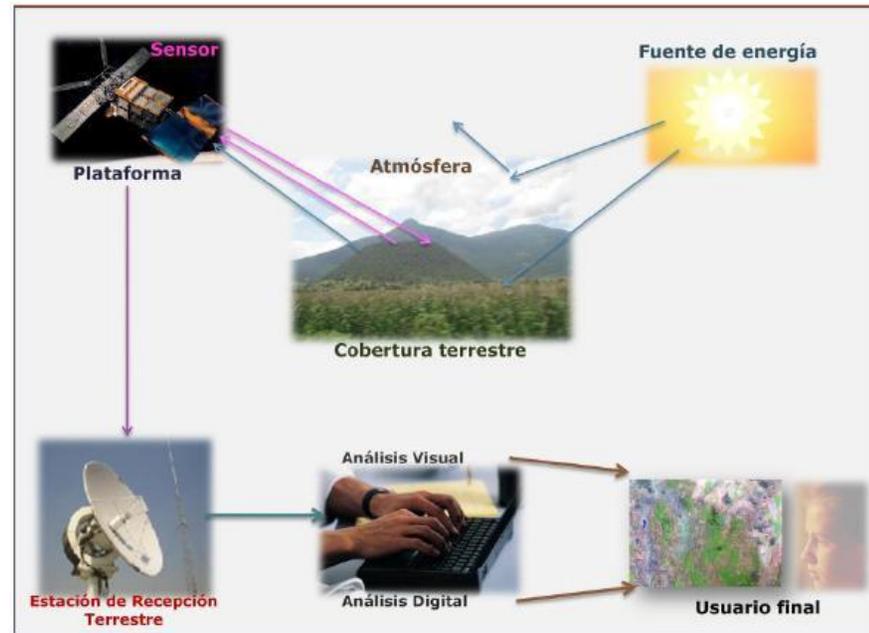
Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) están dirigidos a este objetivo: se puede procesar una gran cantidad de datos que describen el entorno en un modo avanzado tanto en situaciones ordinarias como extraordinarias. El uso de esta herramienta permite generar escenarios útiles para aquellos que toman decisiones sobre la gestión de la tierra. (Figura 11. Mapas impresos obtenidos, con ayuda de SIG, Figura 12. Mapas dinámicos obtenidos, con ayuda de SIG) (Gomarasca, 2009).



### 7.3 PERCEPCIÓN REMOTA

La Percepción Remota es una técnica de carácter multidisciplinario que consiste en la extracción de información acerca de una superficie empleando un mecanismo de transporte de energía (electromagnética por ejemplo) y un arreglo de sensores remotos, los cuales generan datos de dicha superficie en forma de una imagen multispectral (Lira, 1987).

En la definición, el mecanismo de transporte de energía incluye: la luz, el calor, las ondas de radio y excluye los estudios eléctricos, magnéticos y gravimétricos, que miden los campos de fuerza. Los elementos básicos que componen la moderna ciencia de la percepción remota son los mostrados en la siguiente imagen:



Elementos de percepción remota.



Fuente de energía, que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste (teledetección activa). La fuente de energía más importante es la energía solar.

Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

Sistemas sensor, compuesto por el sensor, propiamente dicho y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

Sistema de recepción-comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y, tras las oportunas correcciones se distribuye a los intérpretes.

Intérprete, que analiza esa información normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.

Usuario final, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

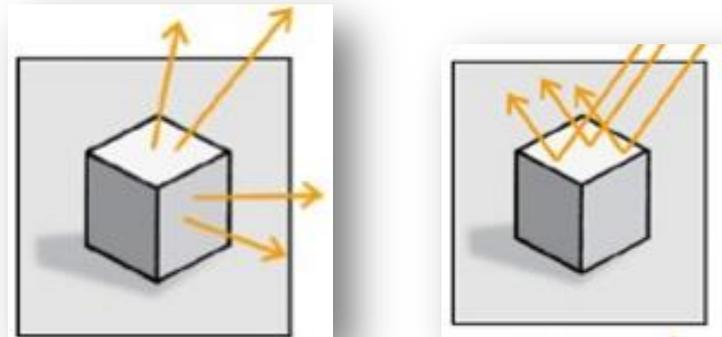
## **7.4 FUNDAMENTOS DE OBSERVACIÓN.**

Para que la observación remota sea posible es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción.

Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía; existen tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión, por emisión-reflexión.



La reflexión es la forma más importante en Percepción Remota, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro Planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras; dicho flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética.



Emisión y reflexión

## 7.5 EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO.

El Espectro Electromagnético es la distribución de la radiación electromagnética de acuerdo a la frecuencia y a la longitud de onda en la que viaja la energía.



El espectro electromagnético se ha dividido en varias regiones espectrales puesto que no existe la manera de detectar la emisión de energía a lo largo de todo el espectro. Según Chuvieco (1995) conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son la forma más frecuente empleadas con la tecnología actual.

Espectro visible (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ). Se denomina así por tratarse de la única radiación electro-magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales:

Banda Azul: (0,4 a 0,5  $\mu\text{m}$ )

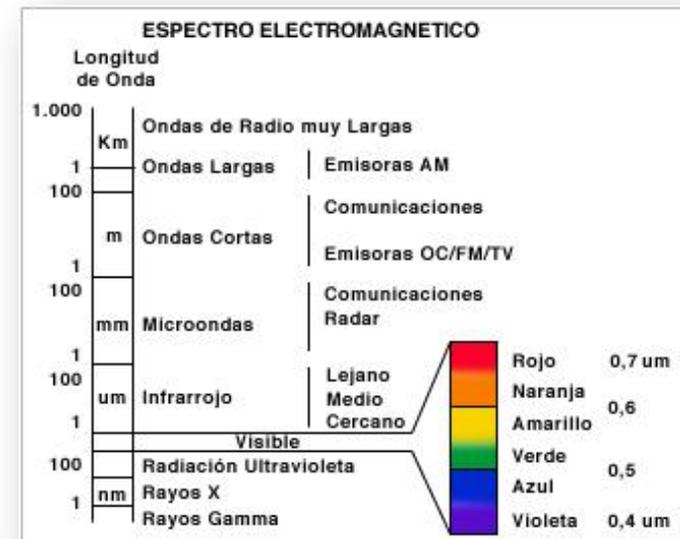
Banda verde: (0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$ )

Banda roja: (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ )

Infrarrojo próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ). Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio (1,3 a 8  $\mu\text{m}$ ). En donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14  $\mu\text{m}$ ). Incluye la porción emisiva del espectro terrestre.



Distribución de ondas en el espectro electromagnético.

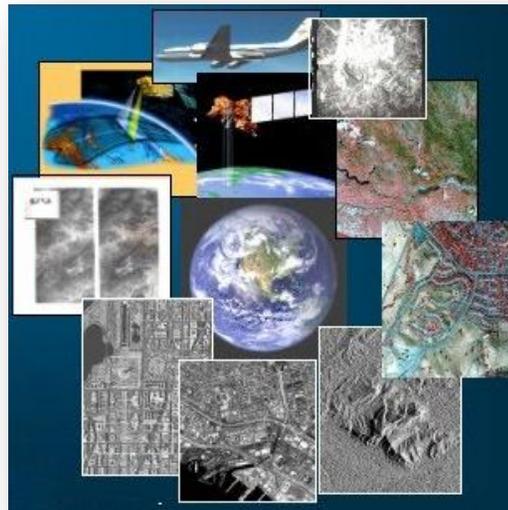
Microondas (a partir de un mm). Con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.



## 7.6 SENSORES REMOTOS

Los sensores remotos son sistemas o instrumentos para captar información de un objeto a distancia. La Percepción Remota se refiere a la adquisición de datos de la superficie terrestre con un sensor remoto, y al procesamiento e interpretación de esos datos. Más específicamente, es la captación de las características físicas de la superficie terrestre, basada en mediciones de radiación reflejada y emitida de cada componente de esa superficie (SEGEMAR).

Entre las variadas formas de clasificar los sensores remotos, una de las más habituales considera su procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas. En este sentido, se habla de dos tipos de sensores: pasivo, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, y activos cuando son capaces de emitir su propio haz de energía.



Obtención de información mediante sensores remotos.



## **7.7 CUALIDADES DE LOS SENSORES.**

### **RESOLUCION DE UN SENSOR:**

Cuando se trabaja con información espacial es fundamental el concepto de escala, que hace referencia a la relación o proporción existente entre un documento (mapa, foto, imagen) y la realidad y nos informa de la cantidad de información susceptible de ser extraída del documento. Si bien en fotografía aérea tiene sentido hablar de escala, en el caso de las imágenes especiales captadas por radiómetros o radares se habla de resolución. Puede definirse la resolución de un sensor como su habilidad para registrar y discriminar información de detalle lo que depende del efecto combinado de sus distintos componentes. La resolución de un sensor implica considerar la calidad de la información aportada en distintos aspectos, por lo que en la práctica se habla de cuatro tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

#### **7.7.1 RESOLUCIÓN ESPACIAL**

La resolución espacial de un sensor viene dada por el campo de visión instantánea (IFOV) definido como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento dado. Depende de la apertura del dispositivo óptico del sensor. No obstante al hablar de resolución espacial se suele utilizar la distancia sobre el terreno correspondiente a este ángulo. Esta distancia es el tamaño de la mínima unidad de la imagen de la que tenemos información, esto es, el tamaño medio del pixel.

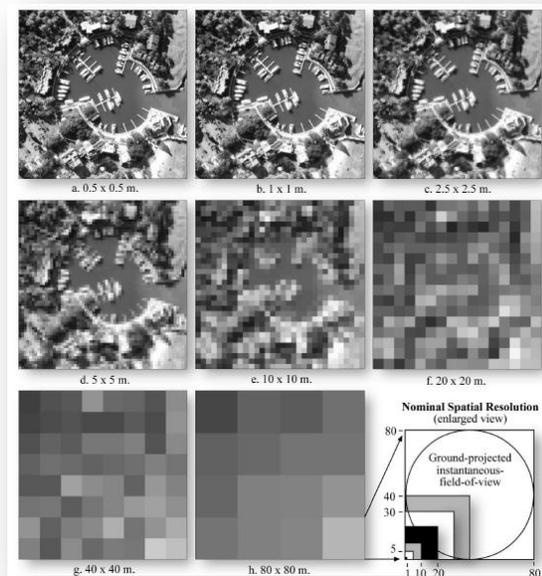
La resolución espacial de un sensor depende de varios factores como son la altura orbital, la velocidad de exploración y el número de detectores. En la actualidad la resolución espacial de los sensores varía desde 0.5m (Geo-Eye) hasta 500 m (Meteosat).

La resolución espacial es un concepto clave a la hora de caracterizar la potencialidad de un sensor ya que marca el nivel de detalle que ofrece la imagen. Nos dice el tamaño mínimo de los elementos discriminables en la imagen. Cuanto menor es el tamaño del pixel, mejor resolución tiene la imagen, es posible discriminar más objetos. No obstante el tamaño del pixel no siempre establece el umbral de elementos discriminables, hay otros factores (geometría, contraste de radiación entre objetos próximos, claridad de la atmosfera) que introducen matizaciones. Por ejemplo en una imagen LANDSAT TM con una resolución espacial de 30 m, es posible discriminar carreteras cuya anchura sea inferior a este umbral ya que se trata de un



elemento lineal. De igual modo un edificio con tamaño inferior a  $900\text{m}^2$  pero ubicado en una zona rodeada de cultivos puede aparecer representado en la imagen si el contraste espectral entre la respuesta del edificio y de la vegetación es suficientemente alto.

En función de su mejor resolución espacial los sensores se clasifican en muy alta, alta, media o baja resolución y, en la actualidad, se trabaja por mejorar la resolución como vía de facilitar la interpretación de las imágenes e incrementar la escala de trabajo.



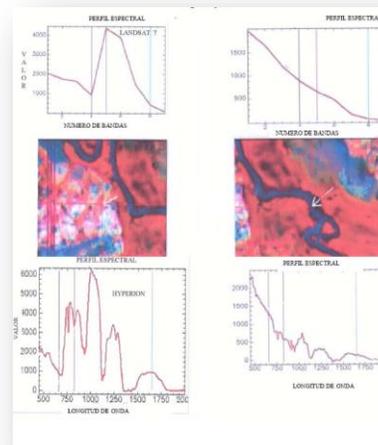
Ejemplos de resolución espacial., desde .5m hasta 80 m.



## 7.1.2 RESOLUCIÓN ESPECTRAL

La resolución espectral de un sensor expresa su aptitud para separar señales de longitudes de onda diferentes y depende del dispositivo de filtro óptico que separa la radiación incidente en bandas espectrales más o menos amplias. La resolución espectral indica el número y la anchura de las bandas espectrales en que un sensor registra la radiación. Por ello cuanto mayor sea el número de bandas y más estrechas sean tanto mejor es la resolución espectral, mayor la capacidad de sensor para reproducir la respuesta espectral del objeto observado y, en consecuencia, la posibilidad de discriminar unas coberturas de otras. Si las bandas espectrales son muy amplias, supone que registra un valor promedio de radiación.

La elección del número, anchura y localización de las bandas espectrales que incluye un sensor está relacionada con los objetivos de su diseño. Un sensor de recursos naturales necesita bandas que permitan discriminar la vegetación y el color de las superficies y por tanto será mejor cuanto mayor número de bandas y más definidas tenga.



Curvas espectrales con diferentes intervalos de longitud de onda.

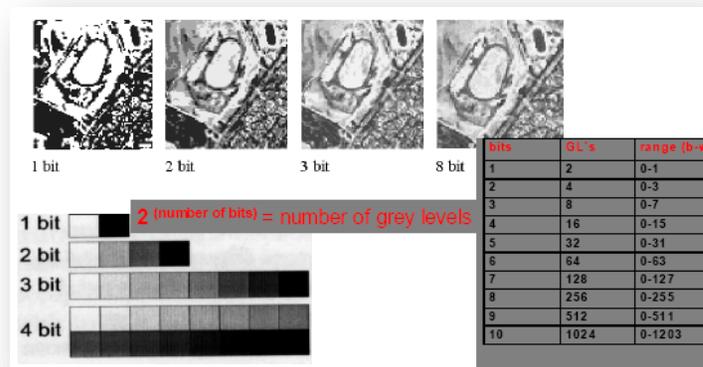


### 7.7.3 RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA.

La resolución radiométrica hace referencia a la sensibilidad de un sensor y expresa su aptitud en una banda espectral dada para diferenciar señales electromagnéticas de energía diferente.

Viene condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. El número máximo de niveles digitales de la imagen suele identificarse con la resolución radiométrica y oscila entre 64, 128, 256, 1024. Este rango de codificación varía con los distintos sensores. Inicialmente los LANDSAT tenían una codificación de 128 o 64 pero, hoy en día, la mayoría de los sistemas ofrecen una digitalización de 256 (0-255).

Lógicamente cuanto mayor sea el número de niveles mejor es la resolución radiométrica y mejor la información. Para un análisis visual no es importante tener muchos niveles de color ya que el ojo humano difícilmente puede percibir más de 64 tonos de gris, pero cuando se opta por el tratamiento informático, la mejora en la resolución puede ser importante.



Ejemplos de resolución radiométrica.





## 7.6 FIRMA ESPECTRAL

Diferentes tipos de superficies, como el agua, la tierra desnuda o la vegetación, reflejan la radiación de manera distinta en varios canales. La radiación reflejada en función de la longitud de onda se llama firma espectral de la superficie. Los elementos del paisaje de mayor interés en la Percepción Remota son el agua, la vegetación y el suelo.

### AGUA

#### **Estado líquido:**

La respuesta espectral del agua depende de la pureza, y de la presencia de partículas en suspensión, el agua pura tiene excelentes propiedades en transmisión en el espectro visible, y de absorción en el infrarrojo, en cambio con respecto a la reflectancia, se presenta un pico en el verde (0,6 aproximadamente) y va reduciéndose hacia el infrarrojo, esta reducción de reflectancia en el infrarrojo es de mucha utilidad para diferenciar, las costas y áreas de tierra de los mares ríos y lagos, además se debe tener en cuenta que al incrementarse la profundidad de los cuerpos de agua la reflectancia disminuye en cualquier longitud de onda. Cuando el agua tiene partículas que la enturbian, la respuesta de la firma espectral depende mucho de dichas partículas en suspensión en el fluido, por ejemplo cuando estas son fitoplancton (como en el mar), la reflectancia aumenta en el verde, y disminuye en el azul.

#### **Estado sólido:**

En el estado sólido (nieve, hielo) la reflectancia aumenta de forma significativa, pero aun así, se va reduciendo a medida que aumenta la longitud de onda, en el visible aumenta tanto, que de hecho puede llegar a saturar los sensores.

### VEGETACIÓN

Sabemos que la vegetación, es un recurso con muchas variedades, y características distintas dependiendo de la especie (hojas, tallos, tronco, humedad, etc.), y además de esto, por ser seres vivos, están sujetos a cambios dependiendo las condiciones ambientales e internas del mismo, es decir, si la vegetación está enferma no va a tener las mismas características que cuando está sana.



La vegetación sana tiene una reflectividad baja en el visible aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila y las bolsas de aire que se generan en el tejido intermedio de las hojas. Esta reflectividad es muy alta en el infrarrojo próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía.

La vegetación que se encuentra enferma presenta una disminución de reflectividad en el infrarrojo, pero aumenta la reflectividad en el rojo y azul (visible). Un factor adicional que afecta la reflectividad de la vegetación es la cantidad de agua que esta posee, pues cuando este aumenta la reflectividad disminuye, y viceversa (inversamente proporcional), debido al comportamiento del agua con respecto a la radiación (visto anteriormente). Debemos aclarar que esta descripción es general, pues el comportamiento aunque es muy similar, varía entre especies.

## **SUELO**

Los suelos tienen un comportamiento espectral, que depende de varias características del mismo, entre estas:

Composición mineral

Componente orgánico

Contenido de aire y agua

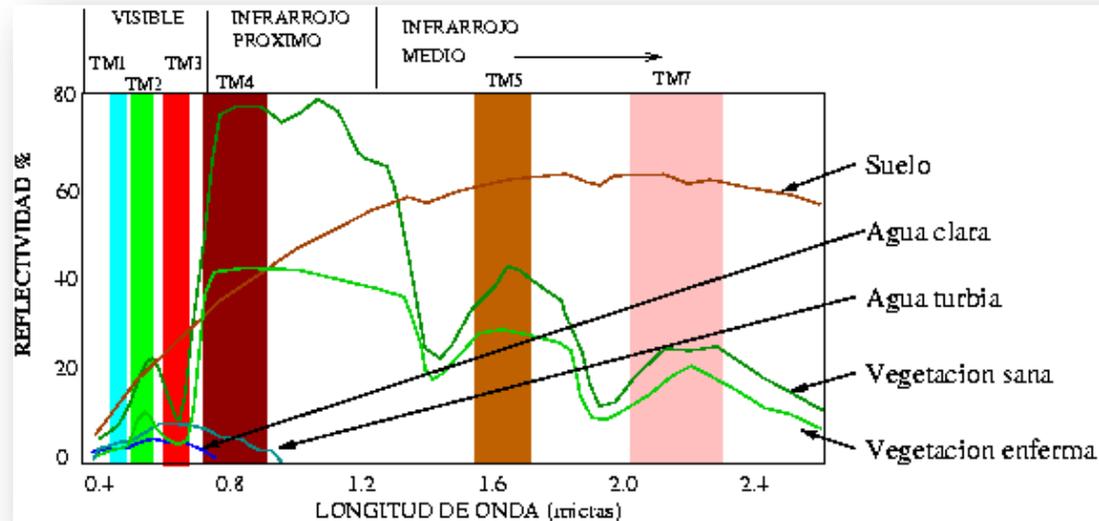
Estructura granulométrica y la textura

Estructura horizontal y vertical

Ángulo de observación e iluminación



Al haber tantas variaciones, simplemente podemos decir que diferentes características, pueden modificar la firma espectral del suelo, por ejemplo, sabemos que cuando mayor cantidad de agua estas tienen, la reflectividad disminuye, así mismo, si tenemos minerales como yeso en el suelo, la reflectividad de este aumenta, y si tenemos cuarzo disminuye. Cuando la superficie es más rugosa la reflectividad también disminuye, y si es lisa aumenta.



Curvas espectrales para diferentes coberturas.



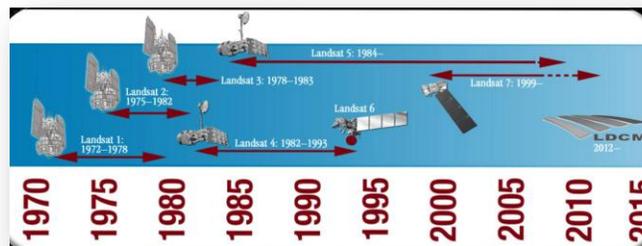
## 8. FUENTES DE INFORMACIÓN

### 8.1 LANDSAT

LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite) fue el primer satélite enviado por los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. Inicialmente se le llamó ERTS1 (EarthResourcesTechnologySatellite) y posteriormente los restantes recibieron el nombre de LANDSAT. La constelación LANDSAT está formada por 7 satélites que provenían, tanto conceptual como estructuralmente, de los satélites para fines meteorológicos Nimbus. Llevaron a bordo diferentes instrumentos, siempre con la filosofía de captar mayor información de la superficie terrestre, con mayor precisión y a mayor detalle, de ahí sus mejoras radiométricas, geométricas y espaciales.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que fueron elegidas especialmente para el monitoreo de la vegetación, para aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos naturales.

Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones.



Fechas de lanzamiento de la constelación LANDSAT.



**Principales características de los satélites LANDSAT.**

Satélite	Lanzamiento (fin servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
Landsat-1	23/07/1972 (6/1/78)	917	18	RBV	(1) 0.48-0.57 (2) 0.58-0.68 (3) 0.70-0.83	80 80 80
				MSS	(4) 0.5-0.6 (5) 0.6-0.7 (6) 0.7-0.8 (7) 0.8-1.1	79 79 79 79
Landsat-2	22/01/1975 (25/2/82)	917	18	Idéntica configuración que Landsat -1		
Landsat-3	05/03/1978 (31/3/83)	917	18	RBV	(1) 0.505-0.75	40
				MSS	(4) 0.5-0.6 (5) 0.6-0.7 (6) 0.7-0.8 (7) 0.8-1.1 (8) 10.4-12.6	79 79 79 79 240
Landsat 4	16/07/1982 -83	705	16	MSS	(4) 0.5-0.6 (5) 0.6-0.7 (6) 0.7-0.8 (7) 0.8-1.1	82 82 82 82
				TM	(1) 0.45-0.52 (2) 0.52-0.60 (3) 0.63-0.69 (4) 0.76-0.9 (5) 1.55-1.75 (6) 10.4-12.5 (7) 2.08-2.35	30 30 30 30 30 120 30
Landsat-5	01/03/1984	705	16	Idéntica configuración que Landsat -4		
Landsat 6	05/10/1993	705	16	No llegó a funcionar		
Landsat-7	15-44-99	705	16	ETM	(1) 0.45-0.52 (2) 0.52-0.60 (3) 0.63-0.69 (4) 0.76-0.9 (5) 1.55-1.75 (6) 10.4-12.5 (7) 2.08-2.35 PAN 0.5-0.9	30 30 30 30 30 120 30 15



## LANDSAT 5

El satélite LANDSAT 5 fue puesto en órbita el 1° de marzo de 1984 portando el sensor MSS y el sensor TM (Mapeador Temático) con captura de datos en 7 bandas diferentes. Su órbita, sincrónica con el sol, tiene una altura de 705 Km y un período de 98.9 minutos, o sea que da 14 vueltas diarias alrededor de la Tierra. Por ser heliosincrónica pasa por una determinada longitud siempre a la misma hora, las 9:45 am (hora local).

El LANDSAT 5 pertenece al programa LANDSAT, financiado por el gobierno de los Estados Unidos y operado por la NASA. Pesa 2200 Kg y tiene una longitud aproximada de 4 metros. Las bandas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas.

Utilidad de las diferentes bandas en la extracción de información

Banda 1: (0,45 a 0,52 micrones - azul -) Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo: coníferas y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.

Banda 2: (0,52 a 0,60 micrones - verde -) Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y, al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.

Banda 3: (0,63 a 0,69 micrones - rojo -) Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.

Banda 4: (0,76 a 0,90 micrones - infrarrojo cercano -) Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

Banda 5: (1,55 a 1,75 micrones - infrarrojo medio -) Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.



Banda 6: (10,40 a 12,50 micrones - infrarrojo termal -) El infrarrojo termal es útil en el análisis del stress de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo termal.

Banda 7: (2,08 a 2,35 micrones - infrarrojo medio -) Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidróxilos (OH) y la absorción de agua.

El mapeador temático (TM) tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, el MSS, y mejor resolución espacial, ya que el tamaño del pixel en todas las bandas excepto la 6, es de 30 metros. La banda 6, que es una banda termal, tiene un pixel de 120 metros en el terreno. El sensor MSS, tiene una resolución espacial de 79 m y espectral de 4 bandas.

Cada imagen cubre 185 x 185 Km (escena completa) aproximadamente pero también es posible fraccionarlas en cuadrantes (1/4 de escena, 90 x 90 Km) o mini escenas de 50 x 50 Km.

## 8.2 LIDAR

La palabra es en realidad el acrónimo de *Light detection and ranging*. Se trata de un potente sistema de recolección de datos que provee información 3D de un determinado ámbito de estudio. Útil para muchos usos como obtención de la superficie, de la vegetación, de los edificios, etc. Dispone de un sensor que utiliza un láser que contiene un transmisor y un receptor. El láser normalmente trabaja en una longitud de onda de 532 a 1550 nm. La precisión en la altura suele estar marcada entre 5 cm y 10 cm, según la mayoría de especificaciones, pero este valor puede ser mayor.

El uso de LIDAR requiere conocer los requerimientos del proyecto en los que se desea usar. Una de las primeras decisiones a tomar es el tipo de técnica para la captura de los datos (aérea, terrestre, etc.). Pero también se deben tener en cuenta las estaciones del año, en función de la aplicación (por ejemplo, por la presencia o ausencia de hojas en los árboles caducos), entre otros factores.



## **Tipos de técnicas de captura de datos**

Los tipos de técnica para capturar los datos LIDAR son:

LIDAR móvil. El sistema está montado en la parte trasera de un vehículo, de tal forma que el láser rota 360 ° continuamente durante la operación, mientras que el vehículo avanza. La precisión en este caso es la mayor en relación con el resto de técnicas. La distancia máxima de alcance suele ser de unos 200 m desde el sensor, y la densidad de puntos por metro cuadrado puede llegar a los 4.000.

LIDAR terrestre. En este caso, el sistema no se mueve (no se encuentra montado sobre ningún dispositivo móvil, sino sobre un trípode), y se utiliza para estudiar un área concreta de interés (por ejemplo un puente). La precisión es muy alta, pero la cantidad de datos a recoger está limitado puesto que se trata de sistemas estacionarios.

LIDAR aéreo. Normalmente utilizado para grandes áreas. El sensor se coloca en un avión, que normalmente vuela a una altura entre 400 y 2.500 m sobre la superficie. La precisión suele estar en este caso entre 9,25 cm y 18,5 cm verticalmente, y entre 20 cm y 1 m horizontalmente.

LIDAR aéreo de baja altitud. Se utiliza normalmente para estudios de vías de comunicación e infraestructuras lineales (por ejemplo, líneas eléctricas). La altitud de vuelo es mucho menor (de 50 m a 800 m sobre la superficie), y normalmente el sensor va montado sobre helicópteros. De esta forma se consiguen densidades que oscilan entre los 20 y los 100 puntos por metro cuadrado, con precisiones también mayores.

### **8.2.1 LIDAR Aéreo**

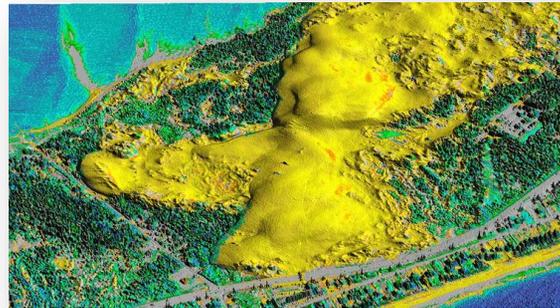
El LIDAR aerotransportado, es un sensor activo que consta de un telémetro emisor de luz láser y de un espejo que desvía el haz perpendicularmente a la trayectoria del avión, generando una serie de pulsos de luz que al entrar en contacto con los objetos o el terreno refleja al sensor parte de la energía del pulso emitido. Una característica distintiva de los retornos en zonas de vegetación es que éstos se pueden producir a diferentes niveles, siendo posible que el último retorno se produzca al nivel del terreno.



Para la generación de la nube de puntos, se eliminan los retornos que presentan anomalías altimétricas (puntos altos y bajos); enseguida los puntos de la nube se comparan con puntos de control terrestre con el objeto de reducir errores sistemáticos en altura; finalmente, se aplica un proceso de ajuste entre líneas que permite reducir otros errores a fin de procurar la redundancia en áreas de sobre posición.

Nube de puntos: Es un conjunto de puntos con posición tridimensional obtenidos a través de tecnología LIDAR. Adicionalmente a las coordenadas X, Y, Z, se cuenta con información característica de este tipo de sistemas que corresponde a los atributos de intensidad, clasificación, número de retorno y tiempo de captura GPS, entre otros.

La nube de puntos es un insumo para la generación de MDE.



Nube de puntos representados en 3D.

La nube de puntos se genera en archivos binarios en formato LAS, que corresponde a un estándar abierto para el intercambio de datos de LIDAR entre generadores y usuarios; es de tipo binario y su uso es alternativo a formatos de sistemas propietarios y genéricos de intercambio ASCII.



La nube de puntos en formato LAS es útil para la generación de imágenes de intensidad; tiene una amplia utilidad para la clasificación y filtrado (automático y manual) de puntos del terreno y los ubicados por encima de éste. Es el insumo principal para la generación de MDE LIDAR en formato vectorial como el TIN (Triangulated Irregular Network) o en Raster como una malla regular de datos de elevación.

### **8.3 SHAPEFILE**

La información de partida con la que contamos es el enunciado y un conjunto de capas temáticas en formato vectorial. Estas capas se proporcionan en formato Shapefile.

El Shapefile es un formato de representación vectorial desarrollado por ESRI (Environmental Systems Research Institute). Consta de un número variable de archivos, en los que se almacena digitalmente la localización de los elementos geográficos (archivo shape \*.shp) junto con sus atributos o características (tabla dBase \*.dbf). Algunas de las características principales de este tipo de archivos son:

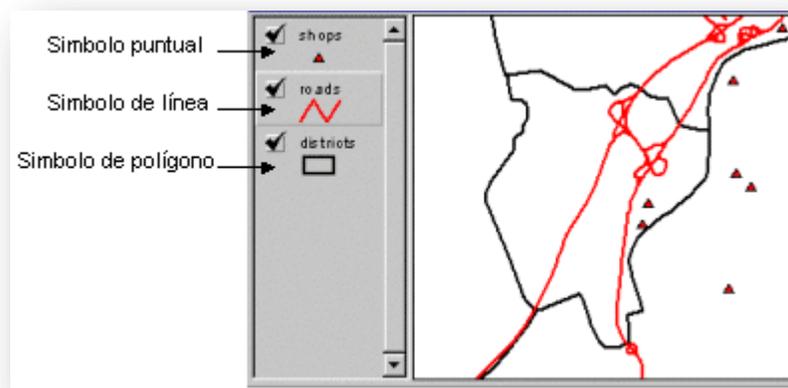
No se trata de un único archivo, si no de entre 3 y 8 archivos independientes. Cada uno de estos archivos tiene una función específica y almacena un tipo de información (elementos geométricos, atributos, proyección, metadatos...)

Los elementos geométricos se almacenan mediante sus vértices en el archivo shape. Actualmente, cada Shapefile solo puede tener un tipo de elementos (puntuales, lineales o polígonos). Dependiendo del tipo de Shapefile, también podremos almacenar valores de altura (PointZ) o mediciones (PointM) en estos vértices.

La información temática y los atributos de cada elemento se almacenan mediante números o cadenas de texto, en una tabla de datos independiente en formato dBase. Cada elemento del Shapefile se relaciona con su registro en la tabla mediante un código identificador.



Un mismo elemento (o registro) puede estar compuesto por varias partes; son los denominados elementos multiparte. Estas capas suelen representar tipologías, y un mismo registro de la tabla se corresponde con varias entidades geométricas independientes con unas mismas características comunes.



Tipos de información Vectorial.

## 8.4 FOTOGRAFIAS AREAS

Las fotografías aéreas son una fuente inestimable de información para el estudio de la naturaleza y las características del medio costero y terrestre. Las fotografías aéreas verticales pueden ser utilizadas para actualizar mapas básicos existentes y para producir nuevos mapas de base, en la forma de fotografías individuales o diversas fotografías ensambladas conocidas como mosaicos.



## Clases de fotografías aéreas

Hay dos clases principales de fotografías aéreas:

- i) Verticales: las lentes de la cámara de prospección apuntan verticalmente hacia abajo produciendo una visión que se asemeja a un plano del suelo;
- ii) Oblicuas: el eje de la cámara de prospección apunta en un ángulo al suelo. Si se incluye el horizonte, la fotografía se define como una oblicua alta; en caso contrario, como una oblicua baja.



Fotografía aérea digital vertical del estado de Campeche CONABIO-SEMAR



## **9. ANALISIS E INTERPRETACIÓN.**

### **9.1 CORRECCIONES DE LA IMAGEN.**

Por corrección se entiende solventar algún defecto en la adquisición, emisión o recepción de la imagen; con este nombre se indican aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización, en los Niveles Digitales (ND) de los píxeles que la componen. Estas operaciones tienden a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea, tanto en la posición de los píxeles como en la radiancia que significan.

Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, ya sea aéreo o espacial, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a muy variados factores. Esto explica que la imagen finalmente detectada no coincida exactamente con el tono-posición-forma-tamaño de los objetos que incluye.

#### **9.1.1 Correcciones radiométricas.**

Este es un término muy genérico, que designa aquellas técnicas que modifican los ND originales, con objeto de acercarlos a los que habría presentes en la imagen.

#### **Restauración de líneas o píxeles perdidos.**

Un mal funcionamiento del sensor o de la antena receptora de la imagen, puede llevar a que esta aparezca en algunas líneas o píxeles perdidos. En una visualización de la imagen, esta presentaría una serie de líneas anómalas (negras o blancas), o incluso una serie de píxeles aislados de similar aspecto. En ambos casos, se trata de información irreparablemente perdida. No puede restaurarse lo que nunca se obtuvo. En consecuencia, los procesos de corrección se dirigen aquí a mejorar artificialmente el aspecto visual de la imagen, facilitando su posterior interpretación.



Puesto que se trata de píxeles perdidos, la forma más lógica de estimar sus ND estriba en considerar los ND de los píxeles vecinos. De acuerdo al conocido fenómeno del auto correlación espacial, muchas variables nos tienden a presentar una fuerte asociación en el espacio. Los valores de radiancia provenientes de una parcela de la superficie terrestre tienden a estar positivamente correlacionados con los provenientes de parcelas vecinas (Campbell, 1981) Por ello, parece razonable estimar los ND de las líneas perdidas a partir de los ND de las inmediatas. La forma más sencilla de este método es sustituir el ND de cada línea/píxel por el de los procedentes:

$$ND_{ij}=ND_{i-1j}$$

Donde  $ND_{ij}$  corresponde al nivel digital del píxel de la línea  $i$  (la defectuosa) y columna  $j$ , y  $ND_{i-1j}$  indica el nivel digital del píxel situado en la línea precedente.

### **9.1.2 Corrección del bandeo de la imagen.**

En algunas imágenes obtenidas por equipos de barrido secuencial (MSS o TM), se observa un bandeo de la imagen especialmente perceptibles en las zonas de baja radiancia (grandes embalses, mar). Estas son como vimos anteriormente distorsiones provocadas por el sensor.

Este bandeo, conocido como “striping” en la terminología anglosajona, se debe a un mal calibrado entre los detectores que forman el sensor; esto es, porque alguno de ellos codifica la radiancia que recibe en ND superiores o inferiores al resto.

Para ajustar digitalmente la señal detectada por cada uno de los sensores se asume que todos ellos, en el caso de estar bien calibrados, tendrían a presentar similares histogramas. Por lo tanto se aplican procedimientos estadísticos para ajustar los histogramas que presenta la imagen y así mejorar el efecto del bandeo.



### 9.1.3 Corrección atmosférica.

La radiación electromagnética se encuentra en constante interacción con la atmósfera en especial dominada por el CO<sub>2</sub>, el vapor de agua y el ozono O<sub>3</sub>. El anhídrido carbónico realiza una fuerte absorción de radiación con longitudes de onda que varían entre 4,3 y 15 micras en los primeros 100 Km. El vapor de agua en su concentración es muy variable y es el mayor absorbente de todos los componentes atmosféricos en las bandas comprendidas entre las 0.7 y 8 micras, inclusive en torno a las 6 micras puede llegar a un 100% de absorción debido a la humedad atmosférica, esta se encuentra en los primeros 15 Km.

El ozono se concentra entre 20 y 50 Km, absorbe la radiación ultravioleta. También es muy importante señalar el polvo atmosférico (0,1 y 10  $\mu$ m) ubicado en los primeros kilómetros que dispersa la radiación visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Finalmente, las nubes que constituyen agua sólida y líquida, dispersa la radiación óptica y en algunos casos el infrarrojo cercano y medio.

El método más simple es el ideado por Chávez, que se denomina corrección del histograma por sus valores mínimos. Este método asume que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absorción (agua, zonas en sombra), deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. En consecuencia, una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los ND de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero:

$$ND_{ijk} = ND_{ijk} - ND_{\min k}$$

Esto es, el ND del pixel (i, j) en la banda k, se ajusta restándole el ND mínimo de esa misma banda.

### 9.1.4 Conversión de DN a parámetros físicos.

La mayor parte de los métodos de análisis de imágenes se han basado en considerar a las de ND como medida radiométricas relativas. Dicho de otro modo, la interpretación ha tratado de establecer las diferencias entre un tipo de cubierta y otro, y no tanto en caracterizar de forma absoluta a esa cubierta.



Los niveles digitales de una imagen pueden transformarse en parámetros físicos, quedando abierta la vía a una medición más absoluta a partir de estos valores. Además de este objetivo, la conversión en valores de reflectividad cubre otros fines: permite realizar, con mayor rigor, los ratios entre bandas; dar un significado físico a la definición espectral de las clases temáticas, y poner en relación imágenes adquiridas en distintas fechas o por distintos sensores.

### 9.1.5 Conversión a radiancia espectral.

El cálculo de la radiancia espectral es un paso fundamental en la conversión de datos de la imagen de múltiples sensores y plataformas a un significado físico. La calibración radiométrica del MSS, TM, ETM+, implica re-escalar los ND crudos (Q) que transmite el satélite a números digitales calibrados ( $Q_{cal}$ ), que tienen la misma escala radiométrica para todas las escenas procesadas por un periodo específico.

Durante la calibración radiométrica, el valor del pixel crudo (Q), datos de la imagen sin procesar se convierten en unidades de radiancia espectral absoluta usando cálculos de punto flotante de 32 bits. Los valores de radiancia son escalados a 7-bit (MSS,  $Q_{calmax}=127$ ) y 8-bit (TM y ETM+,  $Q_{calmax}=255$ ).

La conversión de  $Q_{cal}$  en productos de nivel uno a radiancia espectral ( $L_{\lambda}$ ) requiere el conocimiento de los factores re-escalados originales máximos y mínimos (estos valores se encuentran en el "METADATA FILE"). La siguiente ecuación se usa para convertir a productos de nivel 1 de  $Q_{CAL}$  a  $L_{\lambda}$ :

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda}$$

Ó



$$L_{\lambda} = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale}$$

Dónde:

$$G_{rescale} = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}$$

$$B_{rescale} = LMIN_{\lambda} - \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} Q_{calmin}$$

Dónde:

$L_{\lambda}$ = Radiancia espectral del sensor [ $W/(m^2sr\mu m)$ ]

$Q_{cal}$ = Valor del pixel calibrado [DN]

$Q_{calmin}$ =Valor mínimo del pixel calibrado correspondiente a  $LMIN_{\lambda}$  [DN]

$Q_{calmax}$ = Valor máximo del pixel calibrado correspondiente a  $LMAX_{\lambda}$  [DN]

$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral lanzamiento del sensor [ $W/(m^2sr\mu m)$ ]

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral del sensor [ $W/(m^2sr\mu m)$ ]

$G_{rescale}$ = Valor de Gain [ $W/(m^2sr\mu m)$ ]

$B_{rescale}$ = Valor de Bias [ $W/(m^2sr\mu m)$ ]



### **Conversión de valores de radiancia a valores de reflectancia TOA (Top-Of-Atmosphere).**

Una reducción en la variabilidad de escena a escena se puede lograr por la conversión de la radiancia espectral a la reflectancia exoatmosférica TOA. Al comparar imágenes de diferentes sensores, hay tres ventajas de utilizar reflectancia TOA en lugar de radiancia espectral. En primer lugar, se elimina el efecto de diferentes ángulos cenitales solares debido a la diferencia de tiempo entre las adquisiciones de datos. En segundo lugar, la reflectancia TOA compensa diferentes valores de la irradiancia solar exoatmosférica derivados de la diferencia entre bandas espectrales. En tercer lugar, la reflectancia TOA corrige para la variación de la distancia Tierra-Sol entre la adquisición de datos de diferentes fechas. Estas variaciones pueden ser importantes geográfica y temporalmente.

La reflectancia TOA de la Tierra se calcula según la siguiente ecuación:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s}$$

Dónde:

$\rho_{\lambda}$ = Reflectancia TOA [adimensional]

$\pi$ = Constante matemática 3.1415 [adimensional]

$L_{\lambda}$ = Radiancia espectral medida por el sensor [ $W/(m^2 sr \mu m)$ ]

$D$ = Distancia del sol a la Tierra [unidades astronómicas]

$ESUN_{\lambda}$ = Promedio de irradiancia solar exoatmosférica para el sensor

$\theta_s$ = Angulo de elevación solar.



### 9.1.6 Correcciones geométricas.

Este concepto incluye cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de la imagen. Por contraposición con las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar los ND de los píxeles de la imagen, si no su posición, sus coordenadas. Esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar la geometría de la imagen.

El objetivo de la corrección geométrica es eliminar distorsiones métricas sobre la imagen de manera que ésta se pueda superponer con un mapa, adoptando el mismo sistema de referencia.

#### Modelo de regresión lineal.

Una forma simple de corregir geoméricamente una imagen es mediante un MRL ; sea “y” el valor de una variable, llamada respuesta, que depende del valor de un conjunto de variables ( $z_1, z_2, \dots, z_r$ ), llamadas predictoras, si planteamos una relación de tipo lineal entre ambas:

$y = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_r z_r + \varepsilon$  siendo,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_r$  los parámetros de la transformación que relacionan ambas variables y  $\varepsilon$  el error producido.

Para n observaciones independientes, en las cuales se conoce el valor de la respuesta para cada conjunto de variables predictoras:

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 z_{11} + \beta_2 z_{12} + \dots + \beta_r z_{1r} + \varepsilon_1$$

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1 z_{21} + \beta_2 z_{22} + \dots + \beta_r z_{2r} + \varepsilon_2$$

.....

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 z_{n1} + \beta_2 z_{n2} + \dots + \beta_r z_{nr} + \varepsilon_n$$



Matricialmente

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_{11} & z_{12} & \cdot & z_{1r} \\ 1 & z_{21} & z_{22} & \cdot & z_{2r} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & z_{n1} & z_{n2} & \cdot & z_{nr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \beta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

de forma compacta:

$$\hat{Y} = (Z) \beta + \varepsilon$$

## 9.2 CLASIFICACION DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Una de las grandes ventajas que posee el análisis de datos a través del procesamiento digital, es la de extraer información temática útil. Para ello, se recurre a la clasificación de imágenes.

La clasificación es un concepto del procesamiento digital de imágenes, que contempla los procedimientos mediante los cuales una computadora puede agrupar los píxeles de una imagen, en categorías o clases, dentro de un espacio multiespectral.

La clasificación digital, sigue un procedimiento similar a la fotointerpretación visual: se identifican primeramente las coberturas según tono, textura, forma, modelos, etc. Y luego se expande al resto de la fotografía el modelo o patrón determinado.

Es decir, se asigna determinada categoría a determinada superficie en función del patrón establecido. Si se traduce esto a un análisis digital, se obtiene el esquema de la clasificación digital, que comprende las siguientes fases:



- 1-Definición digital de las categorías: fase de entrenamiento.
- 2- Asignación de los pixeles de toda la imagen a una de esas categorías: fase de asignación
- 3- Comprobación y verificación de resultados
- 4- Corrección de errores.

La fase de entrenamiento, es la que define digitalmente las categorías temáticas a efectos de que posteriormente, el software las reconozca automáticamente. Según se realice esta fase de entrenamiento, es que se dividen las clasificaciones en dos métodos: el supervisado y el no supervisado. En el primero, se parte de un conocimiento previo del terreno en cambio en el segundo, es el software quien delimita las clases, en función de su homogeneidad.

### **9.2.1 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA**

Este método, se utiliza cuando no se conocen las características del terreno, o cobertura "a priori", o bien, porque las características espectrales de la superficie no están claramente definidas en la imagen.

Aquí, el método consiste en orientar a la computadora para que agrupe automáticamente los pixeles en distintas clases de acuerdo con un cierto criterio estadístico.

La ventaja que tiene, es que al no seleccionar un área de entrenamiento teóricamente "homogénea", como en la supervisada, el agrupamiento determina tipos "puros" de cobertura y por consiguiente, se obtiene una representación más cercana de los agrupamientos espectrales naturales de una zona.

La desventaja, es que pueden obtenerse agrupaciones de las cuales, no se conozca el significado y además, la gran cantidad de datos que se manejan.

Aspectos principales a tener en cuenta:



1- Visualizar la imagen: es decir, la representación pictórica de los datos sin analizar. Luego:

a- Valorar los datos y su calidad.

b- Determinar el porcentaje y cobertura de nubes.

c- Seleccionar ventanas (áreas de la imagen a trabajar)

d- Seleccionar muestras representativas dentro de un área de interés para determinar clases espectrales que se usarán en el entrenamiento al clasificador.

2- Definir clases espectrales o entrenamiento: Proceso mediante el cual se instruye a la computadora sobre cómo y cuándo tomar ciertas decisiones. Se basa en parámetros estadísticos y algoritmos de agrupamiento.

3- Clasificar el área de estudio: El clasificador es un algoritmo que toma decisiones para asignar o no, un pixel a determinada clase. En esta etapa, la computadora realiza prácticamente sola el trabajo.

4- Representación pictórica y tabular de la clasificación:

a- Productos gráficos.

b- Tablas estadísticas.

c- Análisis de datos digitales.

5- Evaluación de resultados: Es necesario determinar la exactitud y confiabilidad. El análisis numérico evalúa cuantitativamente el grado de exactitud de una clasificación multiespectral.

Un método no supervisado, puede ser un excelente paso previo para encarar un trabajo de campo que concluye en una clasificación supervisada.



## 9.2.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

En este método, se conoce "a priori" la identidad y localización de algunos tipos de elementos a ser clasificados. Por ejemplo, cobertura de bosques, aspectos urbanos, etc. Esto significa, trabajo de campo, o análisis a través de cartas, fotografías aéreas, experiencias personales, etc.

Los sitios específicos elegidos y conocidos, que representan ejemplos homogéneos, son conocidos como "áreas de entrenamiento" puesto que las características espectrales del mismo, servirán para "entrenar" el algoritmo de clasificación.

Para cada área de entrenamiento, se calculan los parámetros estadísticos (media, desviación estándar, covarianza, etc.), para luego evaluar cada pixel de la imagen, separarlo y asignarlo a una respectiva clase.

Aspectos principales a tener en cuenta:

- 1- Adoptar un esquema de clasificación ordenado.
- 2- Seleccionar áreas de entrenamiento.
- 3- Extraer estadísticas de los datos espectrales del área de entrenamiento.
- 4- Analizar las estadísticas para seleccionar los datos que ofrezcan mayor ventaja (bandas) en el proceso de clasificación.
- 5- Seleccionar el algoritmo de clasificación adecuado:

**Mínima Distancia:** El criterio más sencillo para asignar un pixel a una de las categorías consiste en incluirlo en la más cercana, esto es, en aquella que minimice la distancia entre ese pixel y el centroide de clase. Lógicamente, no se trata de una distancia geográfica, sino espectral, consecuencia de comparar los ND de cada pixel con los del centro de las distintas categorías, para todas las bandas que intervienen en el análisis.



Pueden considerarse varias formas de medir esa distancia espectral entre píxeles y clases. La más empleada, es la distancia euclidiana:

$$d_{xA} = \sqrt{\sum_{k=i}^m \left( ND_{xk} - \overrightarrow{ND_{Ak}} \right)^2}$$

Donde  $d_{xA}$  es la medida de la distancia entre el píxel  $x$  y la categoría  $A$ , que se calcula como la raíz cuadrada de la sumatoria de las diferencias entre el ND de ese píxel y el ND medido de la categoría  $A$ , para las bandas que intervienen en la clasificación.

Paralelepípedos: realiza clasificaciones supervisadas de imágenes de satélite mediante la técnica de paralelepípedos, a partir de la información contenida en una serie de archivos de firmas espectrales. Se basa en una serie de umbrales bajos y altos de reflectividad para cada categoría en cada banda, determinadas por la firma espectral. Para asignar un píxel a una clase determinada, éste debe poseer valores de reflectividad dentro del rango de la categoría en cuestión en cada banda considerada. El proceso de paralelepípedos es el más rápido de los clasificadores supervisados. También, potencialmente, el menos preciso

Esquemáticamente, el píxel  $x$  será asignado a la clase  $A$  si:

$$\overrightarrow{ND_{Ak}} - R_{Ak} < ND_{xk} < \overleftarrow{ND_{Ak}} + R_{Ak}$$

Para todo  $k$ , variando de 1 hasta el número de bandas.  $R_{Ak}$  indica el rango de dispersión concedido a cada categoría, y en cada banda.



Máxima Probabilidad: Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. En pocas palabras, esa función asemeja la distribución real de los ND en esa categoría, por lo que nos sirve para calcular la probabilidad de que un pixel (con determinado ND) sea miembro de ella. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el pixel a aquella que maximice la función de probabilidad. .

6- Clasificar la imagen en n clases.

7- Evaluar estadísticamente la clasificación.

8- Comprobación "in situ" de los resultados de la clasificación o corroboración.

9- Corrección de errores

### **9.3 VERIFICACIÓN.**

El diseño y desarrollo del muestreo supone la columna vertebral del proceso de verificación. El muestreo espacial sirve para seleccionar una pequeña parte del área de estudio, que sea representativa del conjunto. La principal virtud de un buen muestreo es seleccionar adecuadamente una parte de la imagen clasificada, de tal forma que, siendo tan pequeña como sea posible, sea suficientemente representativa del conjunto.



### **Tipos de muestreo.**

Los esquemas de muestreo más empleados son los siguientes:

**Aleatorio simple.** Los elementos a verificar se eligen de forma que todos cuenten con la misma probabilidad de ser seleccionados, y que la elección de uno no influya en la del siguiente. Este tipo de muestreo es el más sólido estadísticamente ya que existe cierta probabilidad de no recoger adecuadamente la variación espacial presente en la imagen clasificada.

**Aleatorio estratificado.** La muestra se realiza dividiendo la población en regiones o estratos, de acuerdo a una variable auxiliar (altitud por ejemplo); con este método se puede reducir el error de muestreo si la variable auxiliar se elige correctamente.

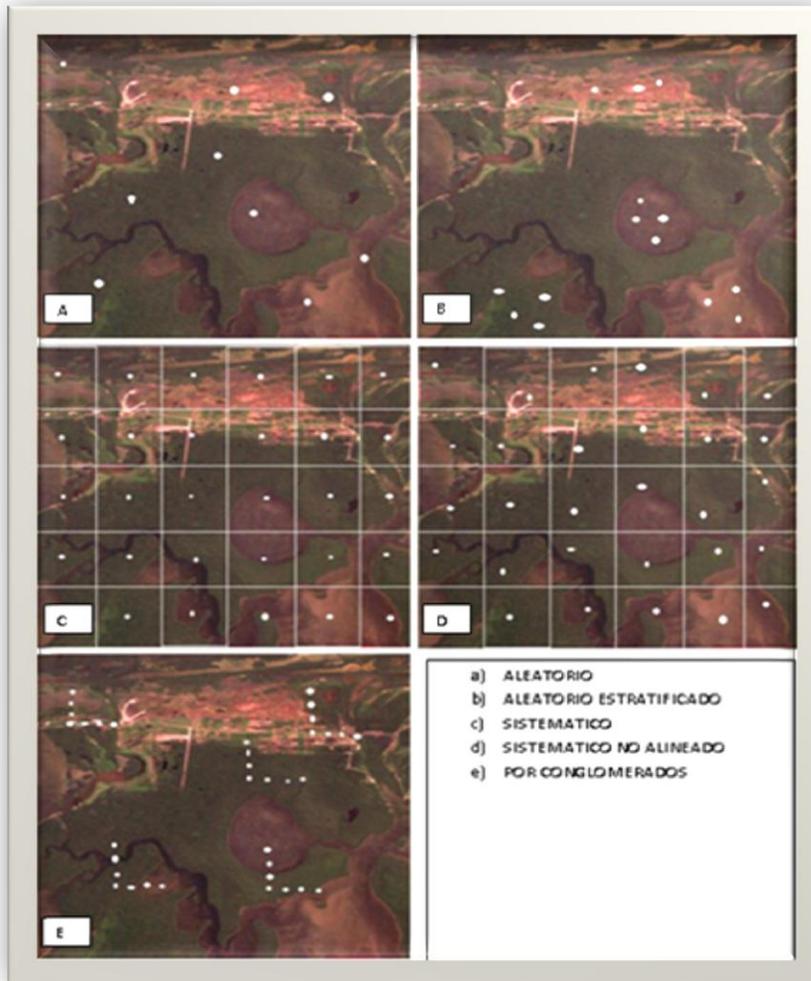
**Sistemático:** La muestra se distribuye a intervalos regulares, a partir de un punto origen señalado aleatoriamente. Garantiza un muestreo completo de la superficie a verificar, pero puede facilitar estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área observada.

**Sistemático no alineado:** Modifica el esquema anterior, gracias a variar aleatoriamente una de las dos coordenadas. Esto permite introducir una cierta aleatoriedad en la elección de la muestra, mientras reduce el sesgo debido a la periodicidad y por otra parte sigue garantizando una revisión completa del territorio.

**Conglomerados:** Se selecciona como unidad de muestra un grupo de observaciones, denominado conglomerado, en lugar de individuos aislados. En otras palabras en cada punto a verificar se toman varias muestras, en puntos vecinos al elegido aleatoriamente, y de acuerdo a un esquema prefijado.



## 9.4 TAMAÑO DE LA MUESTRA.



En cuanto al tamaño de la muestra, se sugiere una superficie aproximada al 1% de la superficie cartografiada, en este como en otros muestreos, el tamaño de la muestra depende del nivel de probabilidad, que quiera otorgarse a la estimación, así como la propia variabilidad de la imagen considerada. Como se trata de medir una variable binomial (acierto-error) se emplea normalmente la siguiente formula:

$$n = \frac{z^2 pq}{E^2}$$

Donde z es la abscisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad; p indica el porcentaje de aciertos estimados; q el de errores ( $q=1-p$ ) y E, el nivel permitido de error.

Una vez diseñado el método y tamaño de la muestra, y localizados los puntos de verificación, el paso siguiente consiste en obtener para cada uno de ellos, la clase real y la deducida de la clasificación. La primera puede



obtenerse a partir de trabajos de campo o de documentos auxiliares de mayor detalle (fotografías aéreas, mapas de cultivos o vegetación), mientras que la segunda se adquiere a partir del fichero digital con la imagen clasificada.

## **9.5 MATRIZ DE CONFUSIÓN.**

En un sentido estricto ninguna clasificación puede considerarse completa hasta que su grado de exactitud sea evaluado. Este puede definirse como el grado de concordancia entre las clases asignadas por el clasificador y sus ubicaciones correctas según datos de tierra recolectados por el usuario y considerados como datos de referencia a tomar el conjunto de datos de entrenamiento, aunque obviamente este procedimiento conduce a sobreestimar la exactitud de la clasificación.

Este procedimiento constituiría en realidad sólo una evaluación de la calidad de selección de las áreas de entrenamiento. También podría recurrirse a una validación cruzada basada en comparaciones con los resultados de otros clasificadores.

El instrumento más usual para evaluar la exactitud de una clasificación es la matriz de confusión, también llamada matriz de error o de contingencia. Esta es una matriz cuadrada de  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de clases. Dicha matriz muestra la relación entre dos series de medidas correspondientes al área en estudio.

La primera serie corresponde a datos de referencia adquiridos de observaciones de campo, inspección de estadísticas agrícolas, interpretación de fotos aéreas y otras fuentes similares. La segunda corresponde a la categorización de los píxeles realizada por el clasificador para las clases de interés. En una matriz de confusión las columnas corresponden a los datos de referencia, mientras que las filas corresponden a las asignaciones del clasificador. La diagonal principal de la matriz expresa el número de aciertos por categoría y la relación entre aciertos y el total de puntos de validación expresa la fiabilidad global, mientras que los residuales por columnas indican categorías no incluidas (error de omisión) y los residuales por filas implican cubiertas mal clasificadas (error por comisión).



## 9.6 COEFICIENTE KAPPA.

A partir de la matriz de confusión es posible evaluar el coeficiente kappa, el cual es un indicador global de la calidad de la clasificación. Mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar; es decir, intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios (Congalton, Oderwald y Mead, 1983; Hudson y Ramn, 1987; Congalton, 1991). El coeficiente kappa puede ser calculado de la siguiente manera:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r (X_{ii}) - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Donde N es el número total de píxeles de referencia,  $X_{ij}$  es el número de observaciones en la fila i y columna j,  $X_{i+}$  son los totales marginales de la fila i,  $X_{+i}$  los totales marginales de la columna i y r es el número de filas en la matriz.

Los valores máximos y mínimos de kappa dependen del contenido de todas las celdas de la matriz de confusión y no sólo de los valores de la diagonal principal; de modo que si todos los elementos que se encuentran fuera de la diagonal principal fueran iguales a cero, tendríamos concordancia completa,  $K = 1$ . Si todos los valores de la diagonal principal fueran nulos, estaríamos en un caso de completa discordancia, con  $K = -1$ .

El valor obtenido para el coeficiente kappa, se puede relacionar con la siguiente tabla.

Valor de K	Fuerza de concordancia
<0.20	Pobre
0.21-0.40	Débil
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Bueno
0.81-1.00	Muy bueno.



## 10. MATERIALES Y MÉTODO

### 10.1 MATERIALES

Para llevar a cabo el estudio, se utilizaron los siguientes materiales: cuatro imágenes del sensor LANDSAT TM, 2 imágenes del sensor LANDSAT 7; así como fotografías aéreas y cartografía a diferentes escalas.

-Imágenes Satelitales

El siguiente cuadro muestra las fechas de la adquisición de las imágenes, el sensor a la que pertenecen y la fuente.

Imágenes de satélite	Fecha de adquisición	Fuente
LANDSAT 4 TM	1992-03-19	U.S. Geological Survey
LANDSAT 5 TM	1992-08-27	U.S. Geological Survey
LANDSAT 5 TM	2000-02-14	U.S. Geological Survey
LANDSAT 7 ETM	2000-04-03	U.S. Geological Survey
LANDSAT 5 TM	2011-02-38	U.S. Geological Survey
LANDSAT 5 TM	2011-03-09	U.S. Geological Survey

Las imágenes se compararon con la cartografía con la que se contaba (límites estatales, carreteras, ríos, etc.), para verificar su georreferencia.



### 10.1.1 Fotografías aéreas

Se utilizó como apoyo fotografías aéreas verticales tomadas en vuelos en helicóptero en el año 2008, estas fotografías y sus coordenadas geográficas obtenidas con GPS al momento de la toma de las fotografías se utilizaron en el proyecto 'Los manglares de México', de la CONABIO.

La siguiente tabla muestra la clave de las fotografías que se utilizaron, así como las coordenadas del punto central.

No.	Clave	Latitud	Longitud	Fecha	No.	Clave	Latitud	Longitud	Fecha
1	FA08VCAM02495	18.6378	-92.1598	12/08/2008	2	FA08VCAM05027	18.4371	-91.5957	12/08/2008
3	FA08VCAM00020	18.5952	-92.432	26/07/2008	4	FA08VCAM05046	18.4266	-91.5783	12/08/2008
5	FA08VCAM00237	18.667	-92.1781	26/07/2008	6	FA08VCAM05075	18.4309	-91.5527	12/08/2008
7	FA08VCAM00505	18.4827	-91.7728	26/07/2008	8	FA08VCAM05100	18.4413	-91.5334	12/08/2008
9	FA08VCAM00549	18.415	-91.7591	26/07/2008	10	FA08VCAM05199	18.5005	-91.4012	12/08/2008
11	FA08VCAM00564	18.3982	-91.7541	26/07/2008	12	FA08VCAM05256	18.516	-91.3296	12/08/2008
13	FA08VCAM01226	18.4331	-91.6391	26/07/2008	14	FA08VCAM05308	18.5292	-91.2706	12/08/2008
15	FA08VCAM01253	18.4465	-91.6294	26/07/2008	16	FA08VCAM05348	18.5649	-91.2542	12/08/2008
17	FA08VCAM01806	18.6469	-92.4584	26/07/2008	18	FA08VCAM05521	18.7031	-91.2054	12/08/2008
19	FA08VCAM01990	18.5031	-92.0684	12/08/2008	20	FA08VCAM05544	18.724	-91.2057	12/08/2008
21	FA08VCAM01991	18.5026	-92.0691	12/08/2008	22	FA08VCAM05569	18.7379	-91.2155	12/08/2008
23	FA08VCAM02088	18.4566	-92.1363	12/08/2008	24	FA08VCAM05583	18.7453	-91.2234	12/08/2008
25	FA08VCAM02170	18.6363	-92.4561	12/08/2008	26	FA08VCAM05604	18.7602	-91.2379	12/08/2008
27	FA08VCAM02171	18.6362	-92.4552	12/08/2008	28	FA08VCAM05616	18.7761	-91.2564	12/08/2008
29	FA08VCAM02554	18.636	-92.1137	12/08/2008	30	FA08VCAM05625	18.7887	-91.274	12/08/2008
31	FA08VCAM02642	18.6385	-92.0307	12/08/2008	32	FA08VCAM05638	18.7995	-91.2987	12/08/2008
33	FA08VCAM02705	18.649	-91.9721	12/08/2008	34	FA08VCAM05711	18.8002	-91.3718	12/08/2008
35	FA08VCAM02761	18.654	-91.9349	12/08/2008	36	FA08VCAM05736	18.7568	-91.523	12/08/2008
37	FA08VCAM02828	18.6785	-91.9664	12/08/2008	38	FA08VCAM05767	18.7456	-91.5585	12/08/2008



## 10. MATERIALES Y MÉTODO

39	FA08VCAM02856	18.6765	-91.9994	12/08/2008	40	FA08VCAM05783	18.7412	-91.5824	12/08/2008
41	FA08VCAM02878	18.6642	-92.0221	12/08/2008	42	FA08VCAM05794	18.7387	-91.6053	12/08/2008
43	FA08VCAM02951	18.6819	-92.0947	12/08/2008	44	FA08VCAM05887	18.6509	-91.7593	12/08/2008
45	FA08VCAM02988	18.663	-92.1212	12/08/2008	46	FA08VCAM05888	18.6511	-91.7584	12/08/2008
47	FA08VCAM03230	18.6302	-92.4581	12/08/2008	48	FA08VCAM05898	18.6587	-91.7473	12/08/2008
49	FA08VCAM03272	18.506	-92.3839	12/08/2008	50	FA08VCAM05914	18.6722	-91.7383	12/08/2008
51	FA08VCAM03313	18.5399	-92.3686	12/08/2008	52	FA08VCAM05966	18.6733	-91.6955	12/08/2008
53	FA08VCAM03345	18.5402	-92.342	12/08/2008	54	FA08VCAM06013	18.6837	-91.6563	12/08/2008
55	FA08VCAM03347	18.5399	-92.3405	12/08/2008	56	FA08VCAM06027	18.6956	-91.6507	12/08/2008
57	FA08VCAM03348	18.5397	-92.3397	12/08/2008	58	FA08VCAM06029	18.6964	-91.6504	12/08/2008
59	FA08VCAM03367	18.5327	-92.3295	12/08/2008	60	FA08VCAM06041	18.7079	-91.6461	12/08/2008
61	FA08VCAM03369	18.5322	-92.3291	12/08/2008	62	FA08VCAM06052	18.7161	-91.6427	12/08/2008
63	FA08VCAM03370	18.5311	-92.3282	12/08/2008	64	FA08VCAM06079	18.7339	-91.6187	12/08/2008
65	FA08VCAM03401	18.5127	-92.3189	12/08/2008	66	FA08VCAM06121	18.7502	-91.5869	12/08/2008
67	FA08VCAM03404	18.512	-92.3186	12/08/2008	68	FA08VCAM06142	18.7511	-91.5688	12/08/2008
69	FA08VCAM03475	18.4809	-92.2894	12/08/2008	70	FA08VCAM06181	18.7513	-91.5304	12/08/2008
71	FA08VCAM03476	18.4805	-92.2889	12/08/2008	72	FA08VCAM06194	18.7565	-91.5224	12/08/2008
73	FA08VCAM03546	18.4907	-92.2543	12/08/2008	74	FA08VCAM06221	18.7907	-91.4745	12/08/2008
75	FA08VCAM03623	18.5574	-92.2972	12/08/2008	76	FA08VCAM06235	18.8039	-91.4673	12/08/2008
77	FA08VCAM03681	18.5811	-92.283	12/08/2008	78	FA08VCAM06267	18.8222	-91.4523	12/08/2008
79	FA08VCAM03707	18.5682	-92.268	12/08/2008	80	FA08VCAM06290	18.8343	-91.436	12/08/2008
81	FA08VCAM03766	18.5417	-92.2336	12/08/2008	82	FA08VCAM06311	18.8392	-91.4142	12/08/2008
83	FA08VCAM03768	18.5408	-92.2325	12/08/2008	84	FA08VCAM06322	18.8489	-91.4104	12/08/2008
85	FA08VCAM03803	18.5215	-92.2115	12/08/2008	86	FA08VCAM06351	18.8727	-91.4054	12/08/2008
87	FA08VCAM03869	18.5308	-92.1645	12/08/2008	88	FA08VCAM06352	18.8734	-91.405	12/08/2008
89	FA08VCAM03902	18.5353	-92.1487	12/08/2008	90	FA08VCAM06358	18.8769	-91.4018	12/08/2008
91	FA08VCAM03910	18.5435	-92.1451	12/08/2008	92	FA08VCAM06359	18.878	-91.4007	12/08/2008
93	FA08VCAM03911	18.545	-92.1445	12/08/2008	94	FA08VCAM06361	18.8786	-91.4001	12/08/2008



## 10. MATERIALES Y MÉTODO

95	FA08VCAM03937	18.5622	-92.132	12/08/2008	96	FA08VCAM06362	18.8796	-91.3989	12/08/2008
97	FA08VCAM03973	18.5653	-92.1054	12/08/2008	98	FA08VCAM06363	18.8802	-91.3983	12/08/2008
99	FA08VCAM04084	18.4799	-92.1205	12/08/2008	100	FA08VCAM06427	18.8489	-91.3469	12/08/2008
101	FA08VCAM04152	18.448	-92.1119	12/08/2008	102	FA08VCAM06428	18.8484	-91.3461	12/08/2008
103	FA08VCAM04369	18.5519	-92.0387	12/08/2008	104	FA08VCAM06462	18.8586	-91.322	12/08/2008
105	FA08VCAM04420	18.52	-92.0228	12/08/2008	106	FA08VCAM06463	18.8594	-91.322	12/08/2008
107	FA08VCAM04466	18.5061	-91.9865	12/08/2008	108	FA08VCAM06584	18.9487	-91.2603	12/08/2008
109	FA08VCAM04508	18.4799	-91.9715	12/08/2008	110	FA08VCAM06598	18.9491	-91.2499	12/08/2008
111	FA08VCAM04535	18.5145	-91.9503	12/08/2008	112	FA08VCAM06600	18.9488	-91.2492	12/08/2008
113	FA08VCAM04567	18.5667	-91.9576	12/08/2008	114	FA08VCAM06603	18.9477	-91.247	12/08/2008
115	FA08VCAM04584	18.5926	-91.9675	12/08/2008	116	FA08VCAM06621	18.9395	-91.2292	12/08/2008
117	FA08VCAM04636	18.6146	-91.9196	12/08/2008	118	FA08VCAM06627	18.9376	-91.2239	12/08/2008
119	FA08VCAM04648	18.5969	-91.9148	12/08/2008	120	FA08VCAM06637	18.9348	-91.2124	12/08/2008
121	FA08VCAM04687	18.5479	-91.9339	12/08/2008	122	FA08VCAM06643	18.9344	-91.2061	12/08/2008
123	FA08VCAM04714	18.5301	-91.902	12/08/2008	124	FA08VCAM06663	18.9522	-91.196	12/08/2008
125	FA08VCAM04729	18.5132	-91.8873	12/08/2008	126	FA08VCAM06681	18.9803	-91.1943	12/08/2008
127	FA08VCAM04768	18.4866	-91.846	12/08/2008	128	FA08VCAM06717	18.9977	-91.1618	12/08/2008
129	FA08VCAM04796	18.4639	-91.8392	12/08/2008	130	FA08VCAM06719	18.9976	-91.161	12/08/2008
131	FA08VCAM04809	18.4729	-91.8227	12/08/2008	132	FA08VCAM06727	18.9976	-91.152	12/08/2008
133	FA08VCAM04842	18.4806	-91.7895	12/08/2008	134	FA08VCAM06730	18.9977	-91.1512	12/08/2008
135	FA08VCAM04859	18.4739	-91.7684	12/08/2008	136	FA08VCAM06738	18.9996	-91.1449	12/08/2008
137	FA08VCAM04884	18.462	-91.7397	12/08/2008	138	FA08VCAM06739	18.9998	-91.1441	12/08/2008
139	FA08VCAM04922	18.4394	-91.7065	12/08/2008	140	FA08VCAM06747	19.0032	-91.1348	12/08/2008
141	FA08VCAM04937	18.4432	-91.6875	12/08/2008	142	FA08VCAM06754	19.0064	-91.1262	12/08/2008
143	FA08VCAM04954	18.4436	-91.6689	12/08/2008	144	FA08VCAM06758	19.0079	-91.1216	12/08/2008
145	FA08VCAM05002	18.4399	-91.6269	12/08/2008	146	FA08VCAM06777	19.0179	-91.1081	12/08/2008
147	FA08VCAM06797	19.0464	-91.0944	12/08/2008	148	FA08VCAM06786	19.0349	-91.1017	12/08/2008
149	FA08VCAM06798	19.0468	-91.0936	12/08/2008	150	FA08VCAM06790	19.0396	-91.0999	12/08/2008



### 10.1.2 Cartografía.

EL INEGI apoyado de los vuelos fotogramétricos y otros métodos topográficos y geodésicos tradicionales, ha generado cartografía de información geográfica que sirven como apoyo para diversas áreas de estudio, por lo que se utilizó la siguiente información.

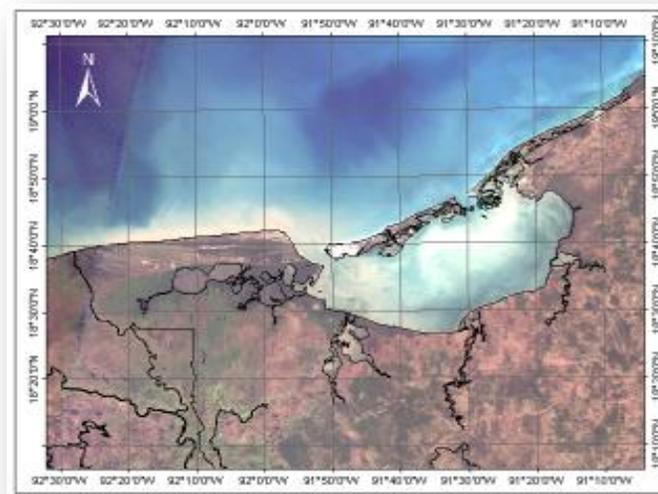
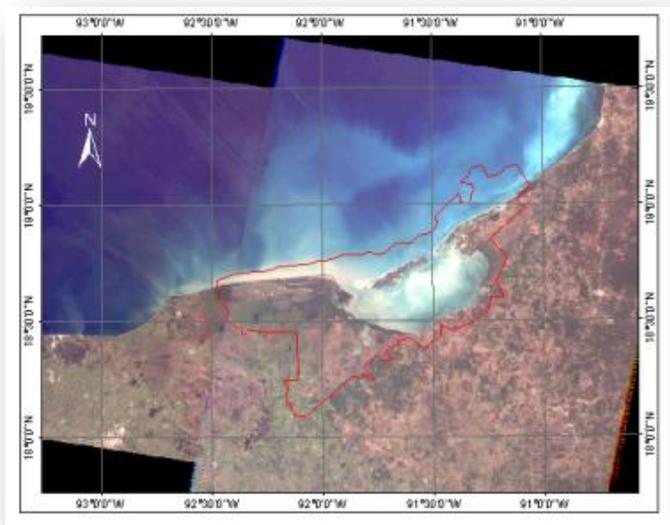
TEMA	ESCALA/ RESOLUCIÓN	FUENTE
MDE SERIE II	30m	INEGI
MDE LIDAR	15m	INEGI
Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación serie I, II, III, IV	1:250000	INEGI
Localidad Urbana	1:1 000 000	INEGI
Cuerpos de agua	1:1 000 000	INEGI
Distribución de los manglares en México	1:50000	CONABIO
Puntos de referencia de fotografías aéreas verticales de manglares	1:1	CONABIO
Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica	1:50000	CONABIO



## 10.2 MÉTODO

El área de estudio, “AREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA LAGUNA DE TERMNIOS”; es cubierta en su totalidad por dos escenas LANDSAT, para cada año de estudio.

Las imágenes se obtuvieron desde el visualizador Glovis, el cual, antes de descargar las imágenes nos brinda varias opciones de procesamiento de la imagen, seleccionamos el nivel 1, porque contiene la georreferencia de la imagen; la cual se comprobó mediante la cartografía mencionada.

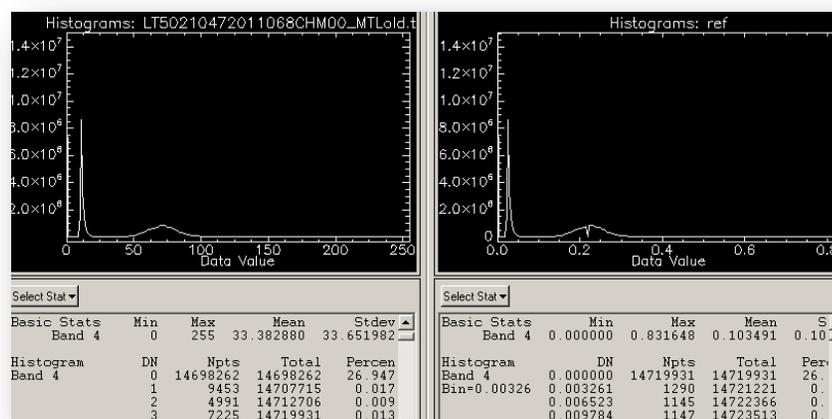


Escenas utilizadas que cubren el area de estudio, y revision de georreferencia mediante cartografía.



Todas las imágenes LANDSAT, se procesaron de la forma mencionada en el capítulo correspondiente a Análisis e Interpretación, con el objetivo de convertir los valores de las imágenes, en valores físicos (Reflectancia).

La siguiente imagen, muestra los histogramas de la banda 4 correspondientes a la escena del año 2011, aparentemente son iguales, pero si observamos los valores máximos y mínimos, nos damos cuenta que del lado izquierdo, tenemos niveles digitales (0-255), mientras que del lado derecho, tenemos valores que representan un valor físico (reflectancia), para este caso (0-.831648).



Histogramas de la banda 4, corregida y sin corregir.

### Clasificación de las imágenes.

Para poder estimar la cobertura de manglar, se utilizaron algunos de los métodos mencionados en el capítulo de Análisis e Interpretación, mediante los cuales se agrupan píxeles cuyas características espectrales son similares. El tipo de clasificación que se realizó para todas las escenas fue supervisado.

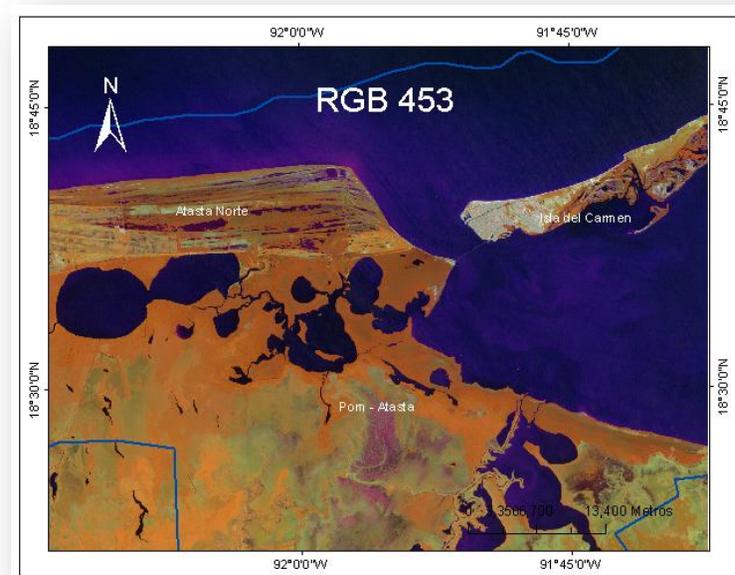


Para poder llevar a cabo dicho método, se realizaron composiciones de color para lograr una mejor distinción de las clases que son de interés.

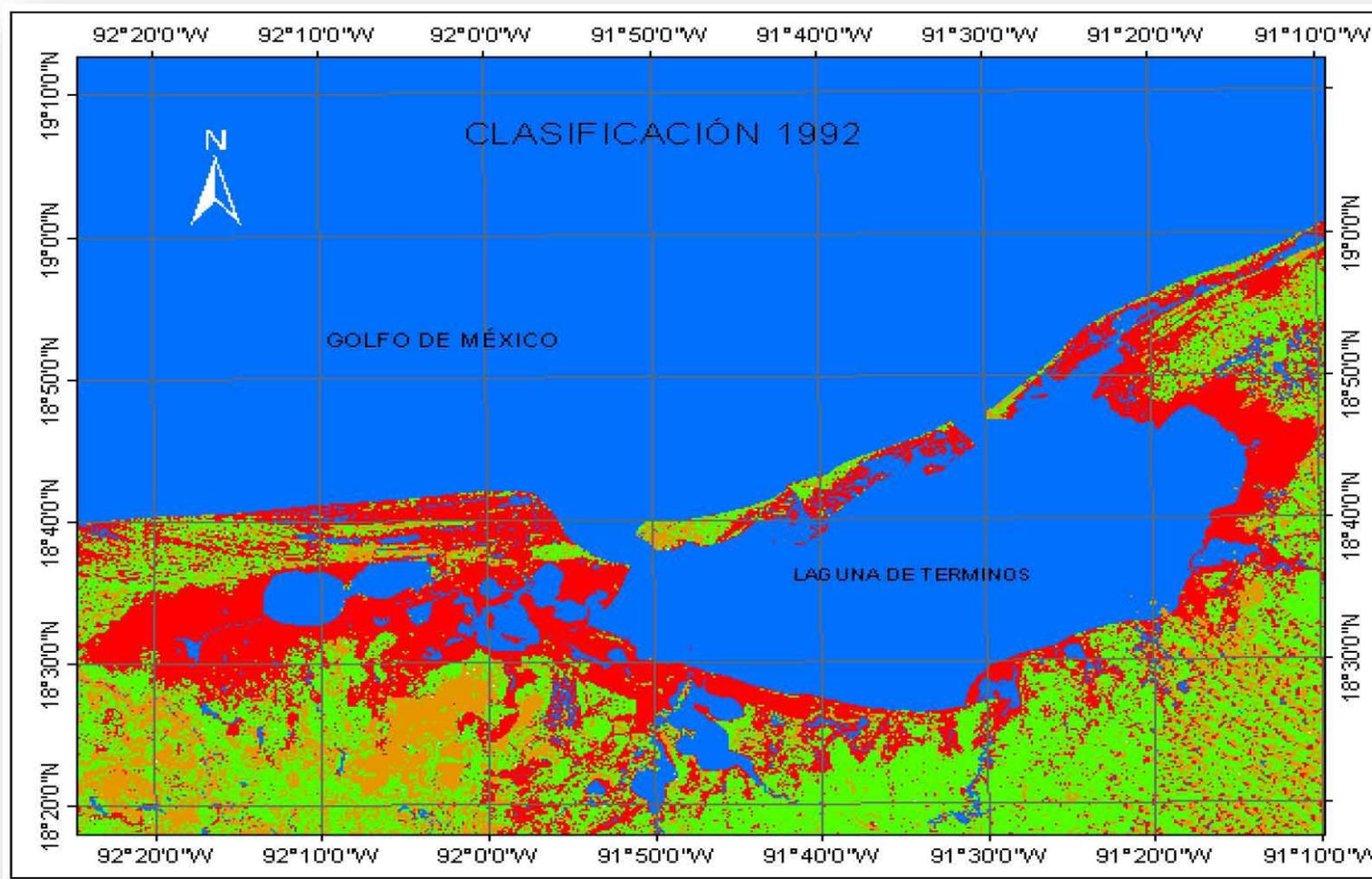
La composición que generó mejores resultados para la interpretación visual fue 453, por que muestra una mayor diversidad de colores para varias clases. La siguiente imagen, muestra dicha composición de bandas en RGB, y se puede observar el manglar en tonos de rojo-naranja, los pastos en tonos de verde muy claro, áreas urbanas en color gris-azul, y las áreas de cultivos en colores naranjas y verdes.

Posteriormente, se selecciona en pantalla los campos de entrenamiento, sobre áreas que identifican claramente a una cubierta, por ejemplo, agua, manglar, zonas urbanas etc. 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).

A partir de las firmas espectrales de los campos de entrenamiento, se clasificaron las escenas, utilizando el algoritmo de máxima probabilidad, ya que a diferencia de otros métodos, este no solo considera los valores promedio, sino también la variabilidad de los valores en cada clase.



Composición en falso color 453.



Clasificación obtenida, para el año 1992



Posterior a la clasificación de las imágenes, se realiza la verificación de los datos obtenidos, mediante un muestreo espacial de tipo aleatorio estratificado, para el cual se utilizó la información vectorial antes mencionada, así como las fotografías verticales aéreas de la CONABIO.

El número necesario de puntos de verificación se obtuvo a partir de la formula

$$n = \frac{z^2 pq}{E^2}$$

Donde se ingresaron los siguientes valores:

Abscisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad 95%

Z= 1.96

Porcentaje de aciertos estimado

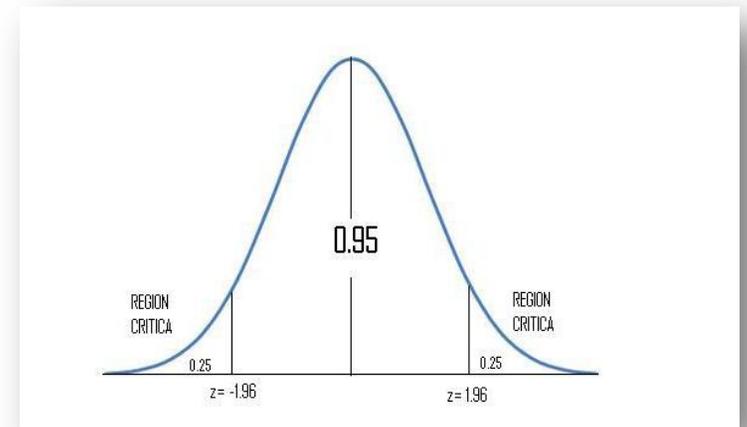
P= 80%

Porcentaje de errores

Q= (100-P)=20%

Nivel permitido de error

E= 5%





El valor obtenido de  $N$  es 245.86, lo que indica que al menos se han de tomar 246 muestras para obtener los niveles de precisión marcados en el muestreo.



Puntos de control utilizados para la verificación.

Con los puntos de control, se realizó la matriz de confusión para cada época, al igual que el coeficiente kappa, con el fin de evaluar la exactitud de las clasificaciones.



## 11. RESULTADOS

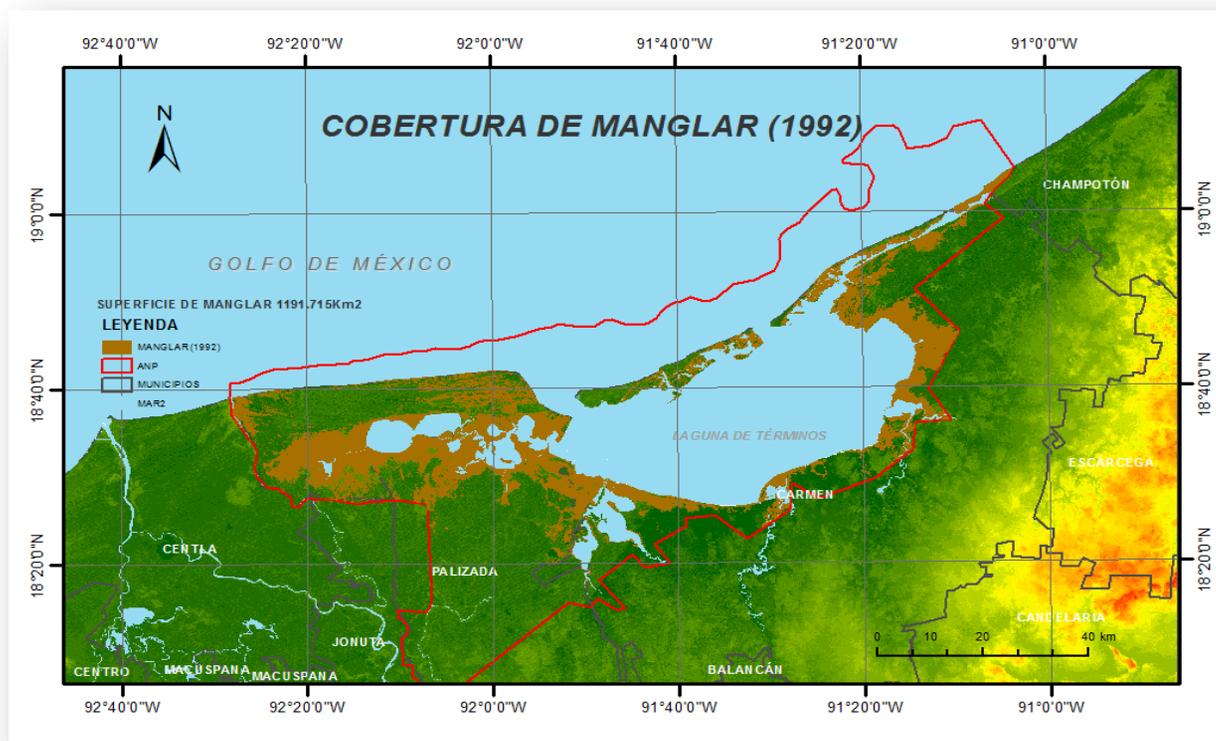
### 11.1 MÉTODO SUPERVISADO Y VALIDACIÓN DE LA EXACTITUD

Como resultado de clasificar las imágenes satelitales para todas las fechas de estudio, se obtuvieron 4 clases que son: cuerpos de agua (Agua), manglar, selva y suelo sin vegetación aparente.

#### 11.1.1 Fecha uno (1992)

Para esta fecha se presentó una ligera confusión al clasificar las imágenes LANDSAT, debido principalmente al contenido de nubes, por lo que algunas zonas tenían un mayor oscurecimiento en la superficie; la respuesta espectral de dicha superficie se alteraba, y como consecuencia el clasificador indicaba que era un tipo de cobertura diferente a la cobertura real.

El resultado obtenido de cobertura de manglar para la fecha uno, se muestra en el siguiente mapa; y la superficie obtenida fue de 1191.71km<sup>2</sup>.



Cobertura de manglar obtenida para 1992.



Una vez obtenida la imagen clasificada, se evaluó la exactitud de la clasificación mediante una matriz de confusión, tomando como verdad de campo el archivo vectorial de puntos de control, generado a través de la información mencionada en el capítulo de fuentes de información, resultando una exactitud total de 93.951% y un coeficiente kappa de 0.8965.

A continuación se muestra la matriz de confusión y podemos observar que de un total de 150 puntos de muestreo que corresponden a manglar se ubicaron solo 140, es decir el 93.33%.

```
Overall Accuracy = (233/248) 93.9516%
Kappa Coefficient = 0.8965
```

Class	Ground Truth (Pixels)					Total
	EVF: Layer:	aEVF: Layer:	dEVF: Layer:	mEVF: Layer:	s	
Unclassified	0	0	0	0	0	0
agua[Red]295p	49	0	1	0	0	50
suelo desnudo[Yell]	0	11	3	1	1	15
mangle[Green]	1	1	140	1	1	143
vegetacion[Blue]	0	1	6	33	1	40
Total	50	13	150	35	35	248

Class	Ground Truth (Percent)					Total
	EVF: Layer:	aEVF: Layer:	dEVF: Layer:	mEVF: Layer:	s	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
agua[Red]295p	98.00	0.00	0.67	0.00	0.00	20.16
suelo desnudo[Yell]	0.00	84.62	2.00	2.86	2.86	6.05
mangle[Green]	2.00	7.69	93.33	2.86	2.86	57.66
vegetacion[Blue]	0.00	7.69	4.00	94.29	16.13	16.13
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

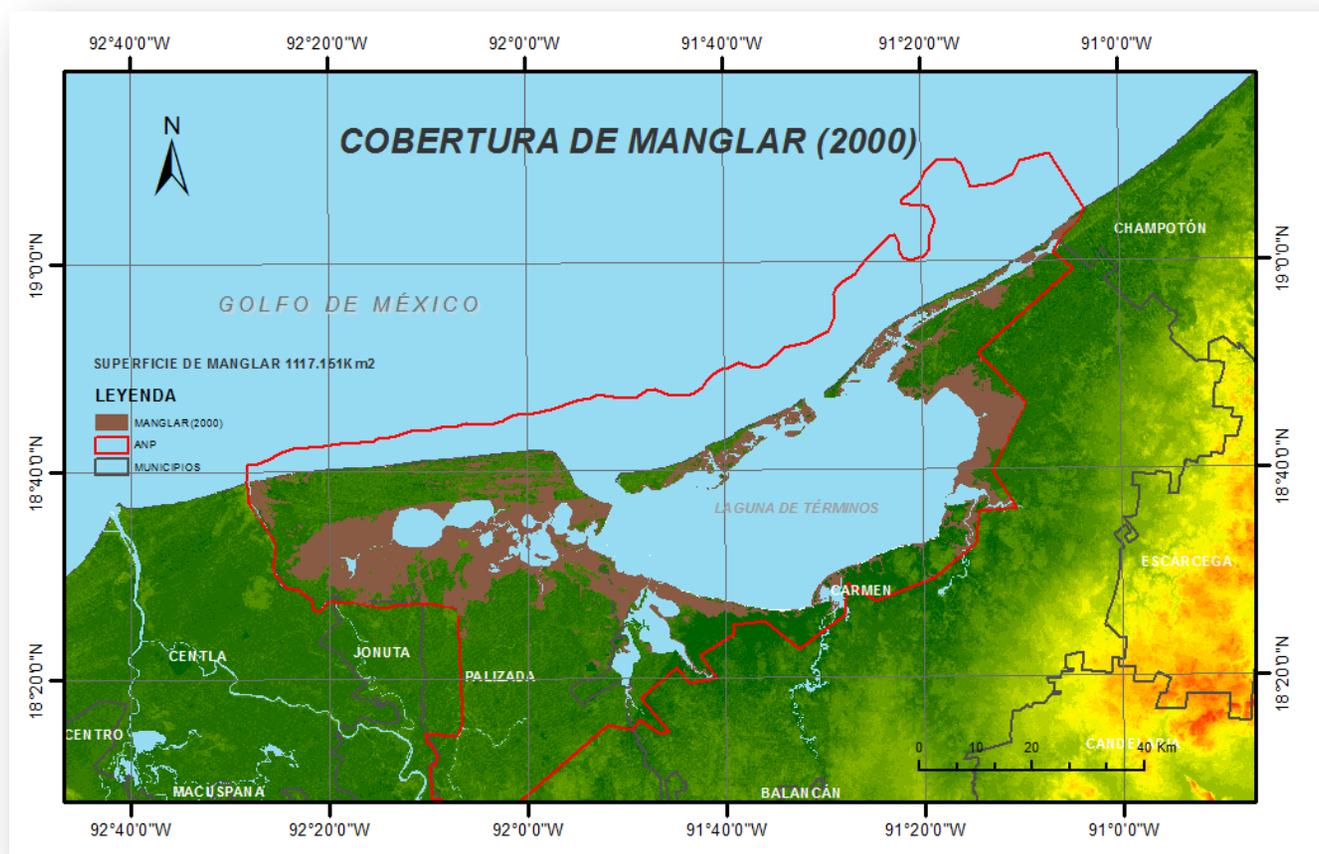
Matriz de confusión para el año1992, obtenida con ENVI.



### 11.1.2 Fecha dos (2000)

Al ser imágenes de diferente sensor, LANDAST 5 y LANDSAT 7 se dificultó más la discriminación de la superficie al momento de ser clasificada, en especial para poder diferenciar el manglar de la selva, sobre todo en aquellos píxeles que contenían a la sombra de las nubes; por lo que muchos píxeles se clasificaron de manera incorrecta y el error no pudo ser corregido del todo.

El resultado obtenido de cobertura de manglar para la fecha dos, se muestra en el siguiente mapa; y la superficie obtenida fue de 1117.15km<sup>2</sup> un 6.25% menos del área obtenida para la fecha uno.



Cobertura de manglar obtenida para el año 2000.



Al igual que para la fecha uno, para la fecha dos también se evaluó lo exactitud y como consecuencia de las dificultades y errores antes mencionados, se obtuvo una menor exactitud total respecto a la fecha uno, siendo esta de 83.467% con un coeficiente kappa de 0.7389; y un total de 121 pixeles correspondientes a manglar de 150 puntos de control, es decir 80.67%.

```
Overall Accuracy = (207/248) 83.4677%
Kappa Coefficient = 0.7389
```

Class	Ground Truth (Pixels)				Total
	EVF: Layer:	dEVF: Layer:	aEVF: Layer:	mEVF: Layer: s	
Unclassified	0	0	0	0	0
suelo desnudo[yello	12	0	15	11	38
agua[Red]187p	0	50	3	0	53
manglar[Green]	0	0	121	0	121
vegetacion[Bl	1	0	11	24	36
Total	13	50	150	35	248

Class	Ground Truth (Percent)				Total
	EVF: Layer:	dEVF: Layer:	aEVF: Layer:	mEVF: Layer: s	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
suelo desnudo[yello	92.31	0.00	10.00	31.43	15.32
agua[Red]187p	0.00	100.00	2.00	0.00	21.37
manglar[Green]	0.00	0.00	80.67	0.00	48.79
vegetacion[Bl	7.69	0.00	7.33	68.57	14.52
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

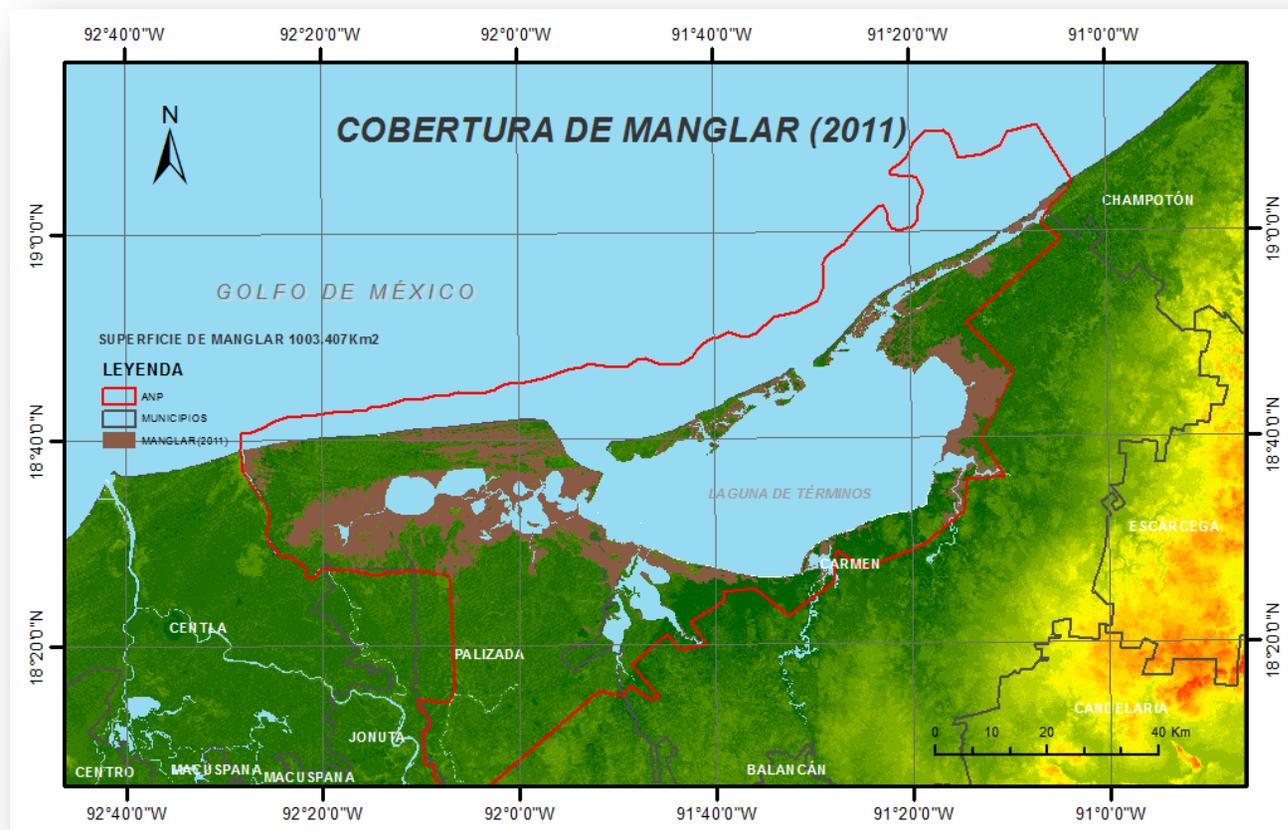
Matriz de confusión para el año 2000, obtenida con ENVI.



### 11.1.3 Fecha tres (2011)

Para esta fecha, se observó una discrepancia espectral principalmente en lo que es manglar, suelo con vegetación y suelo sin vegetación aparente esto debido a causas antropogenicas, por ejemplo la conversión de bosques de manglar en áreas de cultivo o pastura.

El resultado obtenido de cobertura de manglar para la fecha dos, se muestra en el siguiente mapa; y la superficie obtenida fue de 1003.40 km un 15.80% menos del área obtenida para la fecha uno.



Cobertura de manglar obtenida para 2011.



Al igual que para las dos primeras fechas, también se evaluó lo exactitud de la clasificación, y a pesar de las dificultades y cambios en la superficie, se obtuvo una buena exactitud total respecto al año anterior, siendo esta de 90.725% con un coeficiente kappa de 0.8475; y un total de 129 pixeles correspondientes a manglar de 150 puntos de control, es decir 86.0%.

```
Overall Accuracy = (225/248) 90.7258%
Kappa Coefficient = 0.8475
```

Ground Truth (Pixels)						Total
Class	EVF: Layer:	aEVF: Layer:	dEVF: Layer:	mEVF: Layer:	s	
Unclassified	0	0	1	0		1
agua[Red]598p	50	0	5	0		55
suelo desnudo[Yello	0	12	3	0		15
mangle[Green]	0	0	129	1		130
vegetacion[Blue	0	1	12	34		47
Total	50	13	150	35		248

Ground Truth (Percent)						Total
Class	EVF: Layer:	aEVF: Layer:	dEVF: Layer:	mEVF: Layer:	s	
Unclassified	0.00	0.00	0.67	0.00		0.40
agua[Red]598p	100.00	0.00	3.33	0.00		22.18
suelo desnudo[Yello	0.00	92.31	2.00	0.00		6.05
mangle[Green]	0.00	0.00	86.00	2.86		52.42
vegetacion[Blue	0.00	7.69	8.00	97.14		18.95
Total	100.00	100.00	100.00	100.00		100.00

Matriz de confusión para el año 2011, obtenida con ENVI.



## 11.2 ESTIMACIÓN DE LA TASA DE DEFORESTACIÓN DE LA SUPERFICIE DE MANGLAR.

Se calculó en base a los totales de superficie ( $\text{Km}^2$ ) la tasa de deforestación de manglar ( $T_d$ ), expresada en porcentaje de área de boque disminuida por año ( $\%/año$ ) para cada Sitio Prioritario de Manglar con Relevancia Biológica mediante la siguiente ecuación:

$$T_d = \frac{A_1 - A_2}{A_1 * n} * 100$$

Donde  $A_1$  es la superficie en el tiempo inicial expresada en  $\text{km}^2$ ,  $A_2$  es la superficie en el tiempo al final del periodo analizado y  $n$  es el intervalo de tiempo entre las dos fechas de medición  $A_1 - A_2$ , en años.

### Balance de cobertura

Los resultados obtenidos de tasa de deforestación se muestran en la siguiente tabla, en donde los valores negativos indican una ganancia de bosque de manglar, mientras que los positivos indican pérdida de este, dichos valores se interpretan siguiendo la clasificación adaptada de Rev. Forest. Venez. (2002).

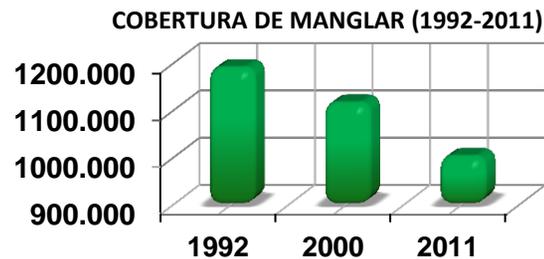
Deforestación (%/año)	Calificativo
<0,5	Baja
0,5-2,0	Media
2,0-3,0	Alta
>3,0	Muy alta



## Comparativo para los años 1992 2000 y 2011 de área de manglar por sitios prioritarios de la laguna de términos.

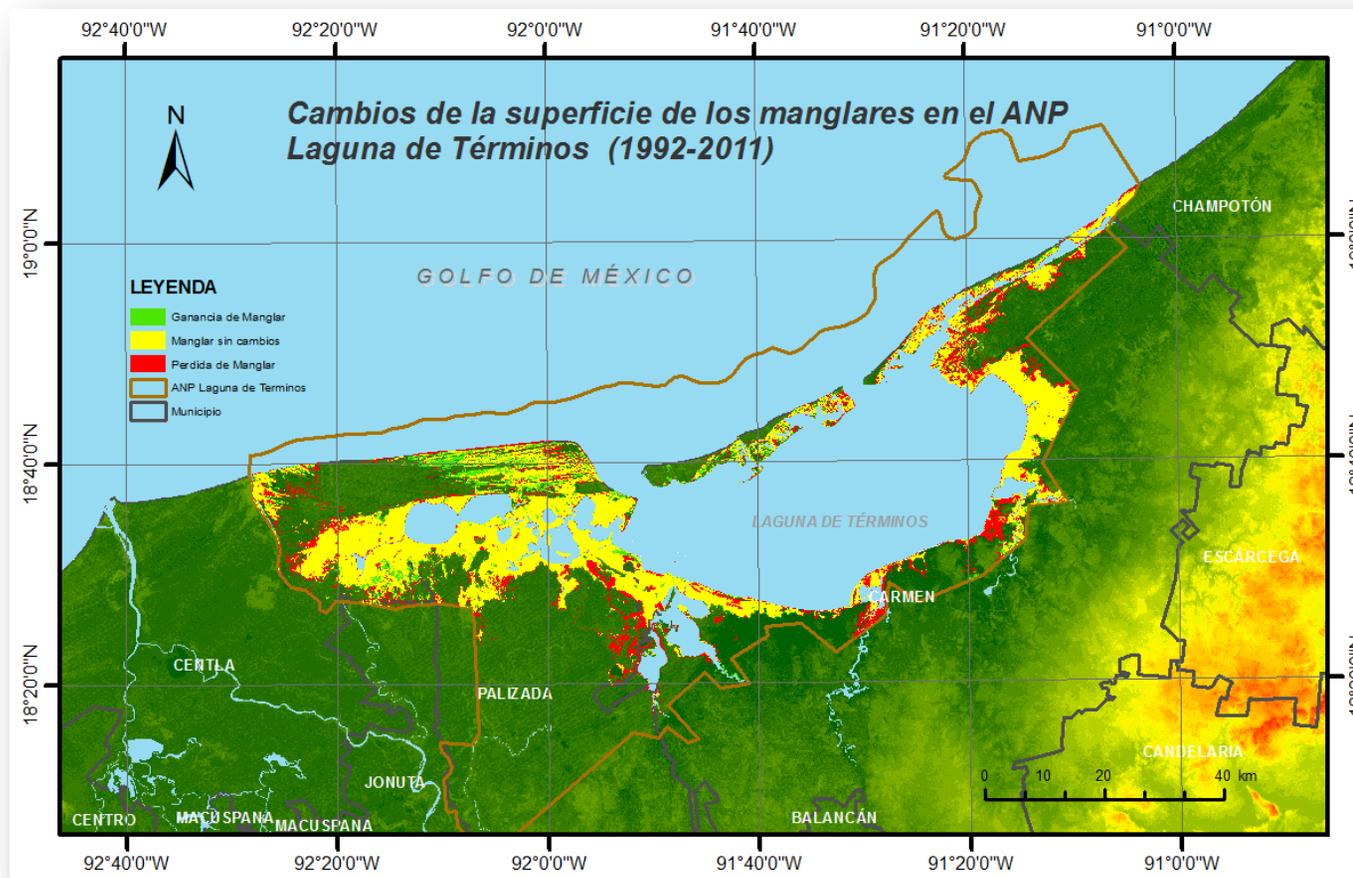
Sitio prioritario de manglar	Área Km2 Año (1992)	ÀreaKm2 Año (2000)	Área Km2 Año (2011)	Deforestación Km2	Tasa de deforestación
Atasta Norte	99,960	70,028	123,418	-23,458	-1,235
Boca del Río Chumpan	38,666	21,186	17,223	21,442	2,919
Isla Aguada-Boca de Pargos	313,118	270,077	226,658	86,460	1,453
Isla del Carmen	42,859	65,281	39,892	2,967	0,364
Pom – Atasta	638,972	645,051	554,065	84,907	0,699
Sabancuy-Chen kan	24,415	18,206	17,432	6,984	1,505
San Pedro-Nuevo Campechito	33,726	27,323	24,719	9,008	1,406
Total	1191,715	1117,151	1003,407	188.308	0,832

El Área Natural Protegida Laguna de Términos, en el año 1992 tenía una superficie de bosque de manglar de 1191,715 km<sup>2</sup>, la cual se redujo a 1003,407 km<sup>2</sup> en 2011. Esta reducción significó la pérdida de 188,308 km<sup>2</sup> lo que equivale a 9.9km<sup>2</sup>/año. Al utilizar la ecuación de la tasa de deforestación se obtuvo una tasa de 0.832 %/año, lo que se considera “medio” según la tabla calificativa de deforestación.





El siguiente mapa muestra 3 clases de cambios en la cobertura de manglar, que son: Ganancia de Manglar (Verde), Manglar sin cambios (Amarillo) y Pérdida de Manglar (Rojo).



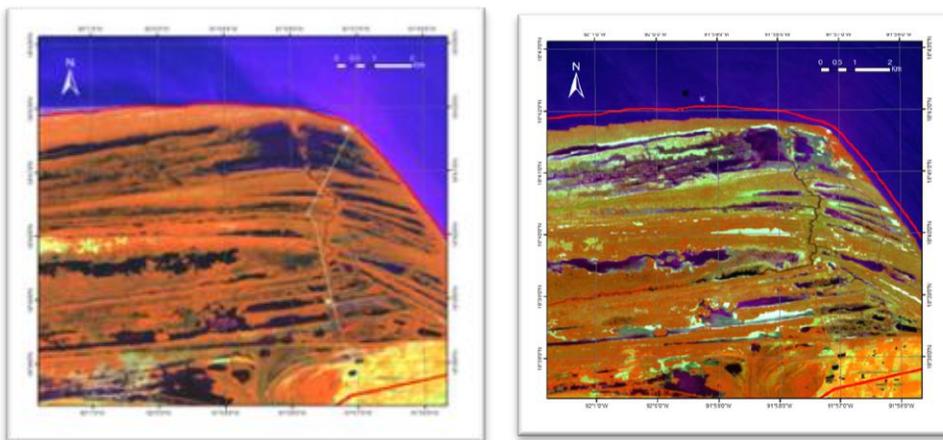
Capas sobrepuestas para detectar las zonas con cambios en la cobertura de manglar.



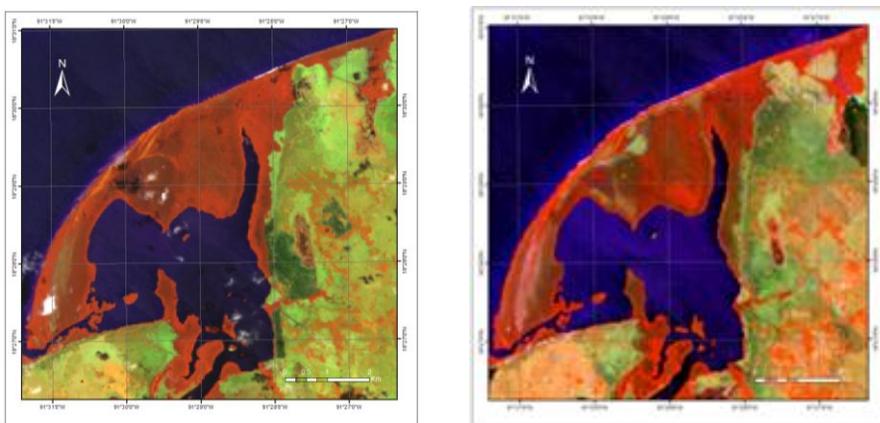
## 11. RESULTADOS

A continuación se muestran algunas imágenes satelitales que dan cuenta de la disminución del bosque de manglar de las zonas con mayor cambio espacial a través del periodo de tiempo en estudio para diferentes Sitios Prioritarios de Manglar con Relevancia Biológica, la imagen del lado izquierdo pertenece al año 1992, mientras que la del lado derecho pertenece al año 2011.

### **ATASTA NORTE (1992-2011)**

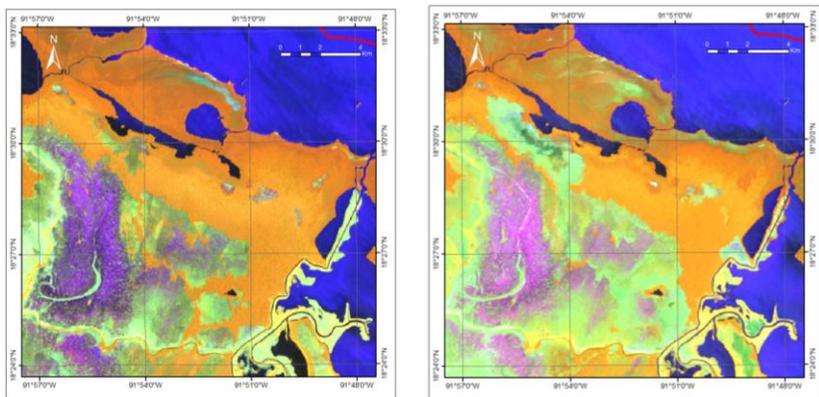


### **BOCA DEL RIO (1992-2011)**

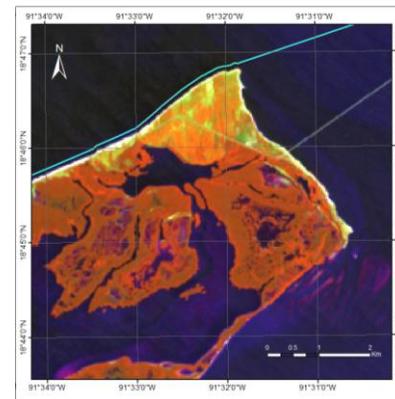




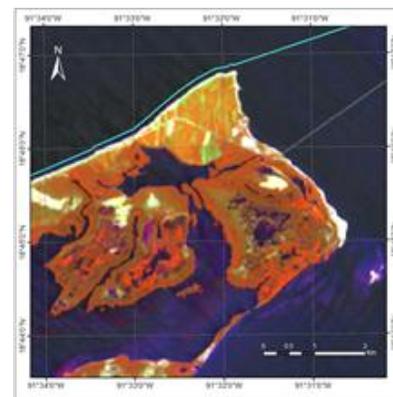
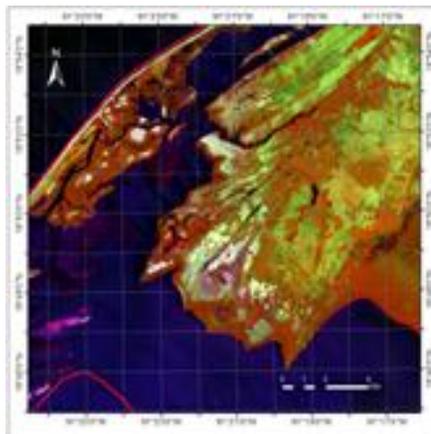
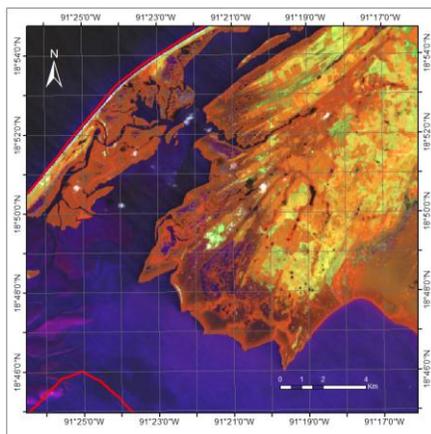
### POOM ATASTA (1992-2011)



### ISLA DEL CARMEN (1992-2011)



### ISLA AGUADA (1992-2011)





## 12. CONCLUSIONES.

Es posible estimar la distribución de bosque de manglar en el Área Natural Protegida Laguna de Términos a partir de imágenes LANDSAT ya que la resolución espacial lo permite.

Aunque el manglar es identificable a partir de una combinación de bandas en las imágenes LANDSAT, al realizar la clasificación para los tres periodos, existe una confusión espectral principalmente con aquellos pixeles que corresponden a cubiertas vegetales.

Los mapas temáticos del ANP "Laguna de Términos" se realizaron con un nivel de exactitud total del 83 al 93% lo que se considera bueno. El mapa del año 1992 registró la mayor exactitud total.

Para mejorar la exactitud de los mapas es conveniente llevar a cabo trabajo de campo, para poder obtener sitios de verificación principalmente en los límites de manglar, así como de otros tipos de vegetación que es en donde se encontró la mayor confusión.

La tasa media de deforestación anual para todo el periodo analizado se estimó en 0.83% la más alta registrándose para el Sitio prioritario de manglar con relevancia biológica Boca del Río Chumpan con 2.9 % mientras que en Atasta Norte se obtuvo un crecimiento de 1.2% anual lo que equivale a 23 km<sup>2</sup>.

De 7 Sitios Prioritarios analizados, solo uno obtuvo ganancia en la cobertura de manglar (Atasta Norte), mientras que en el resto el total de bosque deforestado fue de 188.308 km<sup>2</sup>.

Es de suma importancia realizar un monitoreo del manglar por periodos de tiempo más cortos que permitan determinar con mejor precisión y exactitud la magnitud de los cambios, para conocer más a detalla aquellas zonas críticas que son las que han sufrido una mayor pérdida de la cobertura de manglar; así como conocer el estado de conservación; lo cual servirá para una mejor toma de decisiones con respecto a dicho ecosistema.

Una forma de tratar al bosque de manglar dañado es la restauración, método que se maneja por todo el mundo, pero se utiliza en aquellas zonas en las que no puede recuperarse por sí solo dicho sistema.



## 13. REFERENCIAS

1. Aspectos técnicos de la imágenes Landsat / INEGI, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. México : INEGI, 1984. Disponible en : [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos\\_tecnicos\\_imagenes\\_landsat.pdf](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_imagenes_landsat.pdf)
2. Chuvieco, Emilio / Fundamentos de teledetección espacial. 2ª. Ed. Madrid : Rialp, 1995.
3. Monzalvo-Santos, I.K. Estimación de la cobertura espacial y análisis de la estructura forestal del manglar en Sinaloa, México, aplicando técnicas de percepción remota /  
Idalia Karina Monzalvo-Santos ; asesor Arturo Ruiz Luna. Mazatlán Sinaloa : Monzalvo –Santos, 2006. (Tesis. Maestría en Ciencias del Mar y Limnología) p. 29-46. Disponible en: <http://132.248.9.195/pd2006/0605401/Index.html>
4. Mangle: Informe técnico Estudio de la cobertura de mangle en la República de Guatemala / Gobierno de Guatemala, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales ; PNUMA. Guatemala : El Ministerio ; con el apoyo del Gobierno de España, 2013. Disponible en: <http://www.sia.marn.gob.gt/documentos/Estudio-de-la-cobertura-de-mangle-en-Guatemala-FINAL.pdf>
5. Jardel, Enrique J., Saldaña A., A., Barreiro G., M.T. Contribución al conocimiento de la ecología de los manglares de la Laguna de Términos, Campeche, México. Contribution to the Ecological Knowledge of the Mangrove Forests of the Laguna de Términos, Campeche, Mexico. Ciencias Marinas; 13(3): 1-22, 1987
6. Bocco, G. Mendoza, M. Masera, OR. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 2001, 44: 18-38
7. Uribe Pérez, J. Urrego Giraldo, LE. Gestión ambiental de los ecosistemas de manglar. Aproximación al caso colombiano. Revista Gestión y Ambiente 2009, 12(2) : 57-72 . Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/14254/15064>
8. Evaluación preliminar de las tasas de pérdida de superficie de manglar en México / SEMARNAT, Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de los Ecosistemas, Instituto Nacional de Ecología. México : SEMARNAT, INE, 2005. Disponible en: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/con\\_eco/informe\\_manglar.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/con_eco/informe_manglar.pdf)
9. Berlanga Robles, CA. Ruíz Luna, A. Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. Universidad y Ciencia: Trópico Húmedo 2007, 23 (1):29-46. Disponible en: [www.ujat.mx/publicaciones/uciencia](http://www.ujat.mx/publicaciones/uciencia)
10. Manglares de México: extensión y distribución / Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México: CONABIO, 2009. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/>
11. Travieso Bello, AC. Manglares. En : Manglares de México / Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México: CONABIO, 2008. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/>
12. Hernández, E. Pozzobon, E. tasas de deforestación en cuatro cuencas montañosas del occidente de Venezuela. Rev Forest Venez 2002, 46 (1): 35-42
13. Miranda Ramírez, Lorena. Análisis espacio-temporal del manglar en el Corredor Turístico Cancún-Tulum, Quintana Roo, utilizando imágenes de satélite / Lorena Miranda Ramírez ; asesor Arturo Garrido Pérez. México : Miranda Ramírez, 2008. (Tesis. Lic. en Geografía)



14. Villalobos Zapata, G. J., Yáñez-Arancibia A., Day J. W. y Lara-Domínguez, A. L. Ecología y manejo de los manglares en la Laguna de Términos, Campeche, México, p. 263-274. En: Yáñez-Arancibia, A. y Lara-Domínguez, A. L eds. Ecosistemas de Manglar en América Tropical. México : Instituto de Ecología A.C., 1999. 380 p.
15. Vannucci, M. Mangrove Management and Conservation: Present and Future. Tokio : United Nations University Press, 2004. Available from: eBook Collection (EBSCOhost), Ipswich, MA. Accessed June 17, 2014.
16. Conservation and Sustainable Utilization of Mangrove forests in Latin America and Africa Regions. Okinawa : International Society of Mangrove Ecosystem, International Tropical Timber Organization, 1993. (Mangrove Ecosystems Technical Reports / ISME; vol. 3)
17. The world's mangroves (1980-2005): A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005 / FAO. Roma : FAO, 2007. (FAO Forestry Paper ; 153)
18. Botoncillo. Flora. Ficha técnica. Yucatán Gobierno del Estado : SEDUMA, 2010. Disponible en: <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/flora/fichas-tecnicas/Botoncillo.pdf>
19. Manglares. La voz de nuestras costas /Comité Caborrejeños Pro Salud y Ambiente. CPSA, 2006. Disponible en: [http://www.proambientepr.org/semillas/temas\\_educativos/manglares/](http://www.proambientepr.org/semillas/temas_educativos/manglares/)
20. Los principales cultivos perenes en Campeche. Censo Agropecuario 2007-2012 / INEGI. México : INEGI, 2013. Disponible en: [http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/estados/camp\\_geo.cfm](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/estados/camp_geo.cfm)
21. Interacción radiación electromagnética – materia. Comportamientos y firmas espectrales. Proyecto Spectra. Comunidad Autónoma de Madrid. Disponible en: [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/firma\\_es.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/firma_es.htm)
22. Tecnologías de la información geográfica (TIG) cartografía, fotointerpretación, teledetección y SIG / Manuel Quirós Hernández. Salamanca Ediciones Universidad de Salamanca, 2011.