

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



La Reserva de la Biósfera de Marismas Nacionales; Sinaloa-Nayarit México. Detección de cambio con Técnicas de Percepción Remota (1990-2014).



T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
I N G E N I E R O  
G E O M Á T I C O  
P R E S E N T A  
ITZEL MOLINA SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS: DRA. CLEMENCIA SANTOS CERQUERA

México, D.F. Ciudad Universitaria.

Agosto 2015.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/052/15

Señorita  
ITZEL MOLINA SÁNCHEZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. CLEMENCIA SANTOS CERQUERA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO GEOMÁTICO.

**"LA RESERVA DE LA BIÓSFERA DE MARISMAS NACIONALES; SINALOA-NAYARIT MÉXICO. DETECCIÓN DE CAMBIO CON TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA (1990-2014)"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. HIPÓTESIS
- III. JUSTIFICACIÓN
- IV. OBJETIVOS
- V. ACERCAMIENTO A LOS MANGLARES, DEFINICIÓN E IMPORTANCIA
- VI. PRINCIPIOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA
- VII. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES SATELITALES
- VIII. ÁREA DE ESTUDIO
- IX. METODOLOGÍA
- X. RESULTADOS
- XI. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 8 de junio del 2015.  
EL PRESIDENTE

*Germán López Rincón*

M.I. GERMÁN LOPEZ RINCÓN

*Clemencia Santos Cerquera*

GLR/MTH\*gar.

*Adolfo Reyes Porras*

*Roberto Aguilar*  
23/06/15

*Benito Gómez Durán*  
22/06/15

*Juan Manuel Huéscar*

Adolfo Reyes Porras  
23/06/2015

## Dedicatorias

*Dedico esta tesis con mucho cariño...*

*A los que ya no están a mi lado...=(*

*A mi "Padre Santo, Papito" Mario Molina Y a mí "awuelita preciosa" su fortaleza y creatividad son mi fuente de inspiración. Gracias por todo su amor, cuidados y enseñanzas que me dieron. Sé que siguen y guían mis pasos desde el lugar en que se encuentren, la huella que han dejado en mí y de la que me siento tan orgullosa, hace que siempre los note muy cerca, como una parte más de mi ser. Los amo, los extraño y los recuerdo siempre.*

*A los que siguen al pie del cañón conmigo; Mis dos amores...=)*

*A mi madre querida, madre adorada, no hay palabras ni acciones en el mundo que lleguen realmente a describir lo valiosa e importante que eres para mí, y lo muy agradecida que estoy por todo lo que me has dado, sobre todo por ayudarme y apoyarme a lograr este objetivo profesional, eres maravillosa má! Te quiero mucho y te amo más.*

*A mi mejor amigo, mi gran amor; Gracias Luis por darme el aliento y el apoyo para seguir adelante y nunca rendirme en el camino de mi formación profesional. Por todos nuestros logros y satisfacciones que hemos realizado y seguiremos obteniendo. Te amo con todo mi corazón cuchi!. Muak!*

## Agradecimientos

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería por ser mi Alma Mater y brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional.*

*A la Dra. Clemencia Santos por su apoyo, enseñanza, confianza y paciencia brindada, como mi profesora y directora de esta tesis, por su guía, consejos y amistad.*

*A mis profesores y sinodales, Adolfo Reyes, Benito Gómez, Roberto Ascencio y Juan Manuel Núñez por sus enseñanzas, por compartir sus conocimientos, por su amistad y ser entregados totalmente en beneficio de los alumnos.*

*A Luz y Roberto, mis suegros adorados, (porque toda nuera quisiera tener unos suegros como ustedes), por su apoyo, amistad y amor incondicional y sobre todo por su maravilloso hijo.*

*Al Ing. Molina, mi hermano al que quiero y aprecio mucho, por todo tu apoyo.*

*Muchas Gracias!*

*Se hizo la tierra*

*Se hizo el mar*

*En medio de ellos*

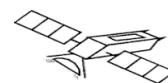
*Nació el manglar*

*Felix Hugo Noblecilla*

## Contenido

Introducción.....	10
Antecedentes .....	12
Hipótesis .....	14
Justificación .....	14
Objetivos .....	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Específicos.....	14
Capítulo ①. Acercamiento a Los manglares. Definición e Importancia.....	16
Definición de manglares.....	16
Los manglares en el mundo .....	16
Importancia de los manglares.....	17
Problemas que enfrentan las comunidades de manglar a nivel mundial .....	18
Impacto ambiental por la destrucción de mangle.....	19
Relación entre los manglares y la producción pesquera .....	20
Importancia del manglar para la actividad camaronera.....	21
Significado y alcances de la acuacultura .....	22
Principales ramas de la acuacultura .....	22
Impacto de los cultivos camaroneros en los manglares a nivel mundial.....	23
Los manglares en México.....	25
La camaronicultura en México. ....	26
Capítulo ②. Principios de la Percepción Remota.....	27
Definición de Percepción Remota.....	27
Elementos que interactúan en la Percepción Remota .....	27
Principios físicos de la Percepción Remota .....	29
Interacciones de la atmósfera con la radiación electromagnética .....	34
Absorción Atmosférica .....	34
Dispersión atmosférica. ....	36
Emitancia espectral de un cuerpo negro a distintas temperaturas.....	37
Terminología y unidades de medida.....	38
Sensores .....	39
Tipos de sensores .....	40
Sensores pasivos.....	40
Sensores Activos .....	41
Tipos de resolución en de un sensor. ....	41
El programa Landsat .....	43
Diferencias y semejanzas de Landsat 8 respecto a Landsat 7.....	46
Diferencias en las combinaciones de bandas de L8 con respecto a L5 y L7.....	47

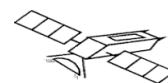




Capítulo ③. Procesamiento y análisis se las imágenes satelitales.....	48
La imagen digital.....	48
La formación de la imagen multiespectral.....	48
Firma espectral.....	50
Pre procesamiento y rectificación de la imagen.....	51
Corrección geométrica.....	52
Fuentes de distorsión geométrica.....	52
Corrección geométrica y georreferenciación.....	52
Método no paramétrico/ Método Polinómico.....	53
Remuestreo de la imagen.....	54
Corrección radiométrica.....	55
El fotodiódodo.....	55
Radiancia.....	56
Reflectividad.....	57
Realces y mejoras visuales de la imagen.....	58
Visualización de imágenes multibanda.....	59
Composición de color.....	59
Análisis de las imágenes.....	60
Clasificación digital.....	61
Clasificación supervisada.....	61
Clasificación no supervisada.....	62
Índices de vegetación.....	63
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	64
Capítulo ④. Área de estudio.....	65
Ubicación geográfica.....	65
Descripción del área de estudio.....	68
Características físicas.....	68
Clima.....	68
Historia de huracanes y tormentas tropicales.....	68
Edafología.....	68
Hidrografía.....	69
Descripción biológica de la RBMN.....	69
Vegetación y especies características.....	69
Descripción de las especies de mangle en la RBMN.....	70
Usos de las especies de manglar.....	71
Faunas y especies características.....	71
Problematía.....	73
Usos y aprovechamientos, actuales y potenciales de los recursos naturales en la RBMN.....	74
Agricultura.....	74
Ganadería.....	75







Forestal .....	75
Pesca .....	76
Sector terciario .....	77
Capítulo ⑤. Metodología.....	78
Recursos utilizados.....	78
Imágenes de satélite .....	78
Software .....	79
Procesamiento .....	79
Tratamientos previos a las imágenes.....	79
Corrección geométrica .....	79
Corrección radiométrica .....	79
Valores de Radiancia .....	80
Valores de Reflectancia.....	82
Edición de imágenes multiespectrales del área de estudio .....	83
Análisis de cobertura de manglar .....	83
Clasificación supervisada .....	84
Generación de mapas temáticos de la cobertura de mangle y cultivos camaroneiros .....	86
Evaluación de la exactitud.....	86
Tasa de deforestación de la cobertura de manglar .....	89
Índice normalizado de vegetación (NDVI).....	90
Capítulo ⑥. Resultados. ....	91
Tratamientos previos a las imágenes .....	91
Corrección radiométrica para las imágenes del sensor ETM+ .....	91
Mapas temáticos de la cobertura del manglar y cultivos camaroneiros. ....	91
Evaluación de la exactitud .....	95
Cultivos Camaroneiros.....	98
Diferenciación de imágenes con el NDVI en la RBMN .....	99
Conclusiones .....	102
Bibliografía .....	104



## Índice de figuras

Figura 1. Raíces de manglares en forma de zanco.....	16
Figura 2. Distribución de los manglares en el mundo.....	17
Figura 3. Biodiversidad marina asociada al manglar .	18
Figura 4. Siembra y repoblación de embalse y cuerpos de agua como forma de acuicultura en sistemas semicontrolados. ....	21
Figura 5. Distribución de los manglares en México .....	25
Figura 6. Formas de Percepción Remota .....	28
Figura 7. Elementos que interactúan en la Percepción Remota. ....	29
Figura 8. Vectores de los campos eléctrico (E) y magnético (M) de la radiación electromagnética.....	30
Figura 9. Relación entre longitud de onda, frecuencia y energía..	31
Figura 10. Relación entre longitud de onda, frecuencia con el espectro electromagnético .....	32
Figura 11. Espectro electromagnético.....	32
Figura 12. Principales interacciones de la atmosfera con la radiación electromagnética.....	34
Figura 13. Ventanas atmosféricas. Tomado Lillesand & Kiefer. Remote sensing and image interpretation. ....	36
Figura 14. Emitancia espectral de un cuerpo negro a distintas temperaturas .....	37
Figura 15. Diagrama que muestra el tamaño de pixel de imágenes pancromáticas y multiespectrales de los satélites SPOT Y LANDSAT.....	42
Figura 16. Cronología del programa Landsat .....	44
Figura 17. Imagen del Programa Landsat-5, Landsat-7 y Landsat-8 .....	45
Figura 18. Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7 .....	46
Figura 19. Formación de la imagen multiespectral. ....	49
Figura 20. Distintos tonos de grises. ....	49
Figura 21. Cubo de color.....	50
Figura 22. Firma espectral .....	51
Figura 23. Ordenes de los polinomios, Imagen satelital TM original (centro) e imagen corregida .....	54
Figura 24. Métodos de interpolación .....	55
Figura 25. Combinación de bandas en una imagen satelital .....	60
Figura 26. Clasificación Supervisada. ....	62
Figura 27. Clasificación No supervisada. ....	63
Figura 28. Localización de la BRMN .....	66
Figura 29. Zona de descanso y alimentación de aves acuáticas .....	67
Figura 30. Manglares de RBMN.....	69
Figura 31. Uso del mangar para cultivos de moluscos .....	71
Figura 32. Evolución del canal de Cuautla a través de imágenes de satélite Landsat. ....	74





**Figura 33.** Usos del manglar en la acuicultura ..... 77

**Figura 34.** En rojo firma espectral del mangle, RBMN, imagen Landsat-5 TM del año 1990.  
Combinación de bandas 5 (infrarrojo medio), 4 (Infrarrojo cercano),3(Rojo). ..... 85

**Figura 35.** Colección de curvas espectrales para la clasificación supervisada. .... 86

**Figura 36.** Corrección radiométrica de imágenes Landsat 7 ..... 91

**Figura 37.** Clasificación para la imagen de Landsat 5..... 92

**Figura 38.** Clasificación para la imagen de Landsat 7..... 93

**Figura 39.** Clasificación para la imagen Landsat 8..... 94

**Figura 40.** Pérdida de cobertura de manglar en la RBMN de 1990 a 2014 ..... 97

**Figura 41.** Comparación del crecimiento de cultivos camaroneros en la RBMN periodo 1990-2014... 98

**Figura 42.** Crecimiento de la industria camaronera durante el periodo 1990-2014. .... 99

**Figura 43.** Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) de RBMN, Sinaloa-Nayarit, coordenadas de los mapas en UTM zona 13N, Datum WGS84..... 100



## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Recomendaciones para la operación de las granjas de cultivo de camarón .....	24
<b>Tabla 2.</b> Principales divisiones del espectro electromagnético .....	32
<b>Tabla 3.</b> Descripción de las bandas espectrales usadas en Percepción Remota .....	33
<b>Tabla 4.</b> Gases causantes del efecto de absorción en la atmósfera .....	35
<b>Tabla 5.</b> Principales tipos de dispersión presentes en la atmosfera.....	36
<b>Tabla 6.</b> Términos y unidades de medida .....	39
<b>Tabla 7.</b> Características del Programa Landsat 5, 7 y 8 .....	44
<b>Tabla 8.</b> Especificaciones técnicas de los sensores TM, ETM+ y Oli del programa Lansat.....	45
<b>Tabla 9.</b> Combinaciones de bandas para los sensores TM, ETM+ Y OLI del programa Landsat .....	47
<b>Tabla 10.</b> Categorías de priorización de la RBMN .....	67
<b>Tabla 11.</b> Ejemplos de la fauna de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales .....	72
<b>Tabla 12.</b> Especificaciones de las imágenes de satélite utilizadas .....	78
<b>Tabla 13.</b> ETM+ Rango espectral .....	81
<b>Tabla 14.</b> Distancia Tierra-Sol en unidades Astronómicas .....	82
<b>Tabla 15.</b> Promedio de irradiancia solar exatmosférica para el sensor ETM+. Ultima fecha de actualización 29 de julio de 2013 .....	83
<b>Tabla 16.</b> Clases para la clasificación supervisada .....	85
<b>Tabla 17.</b> Matriz de error .....	88
<b>Tabla 18.</b> Matriz de error para la imagen Landsat 5/ Sensor TM 1990 .....	95
<b>Tabla 19.</b> Matriz de error para la imagen Landsat 7/ Sensor ETM+ 2000 .....	95
<b>Tabla 20.</b> Matriz de error para la imagen Landsat 8 / Sensor OLI 2014 .....	96
<b>Tabla 21.</b> Estadísticas del índice normalizado de vegetación (NDVI) en la RBMN .....	101



## Introducción

Los bosques de mangle son ambientes complejos y dinámicos caracterizados por sus altos niveles de diversidad biológica y productividad. Además constituyen áreas de refugio y crianza para una amplia variedad de peces y fauna silvestre, desempeñan un papel fundamental en la protección de la línea de costa, la prevención de inundaciones (Berlanga & Ruiz, 2007). También influyen considerablemente en la producción de alimentos, principalmente obtenidos con la actividad pesquera (Rönnbäck, 1999; Lal, 2003).

A pesar de los múltiples beneficios ecológicos, económicos y culturales que los bosques de mangle ofrecen, se trata de uno de los ambientes tropicales costeros más amenazados. A nivel mundial se estima una pérdida de alrededor del 35% de la cobertura de manglar en las pasadas dos décadas, identificándose a la camaronicultura como el principal agente transformador (Valiela, et al., 2001).

En México existen cifras discordantes sobre la extensión actual y las tasas de deforestación de los manglares, lo cual hace necesario la realización de evaluaciones que arrojen información sobre la condición actual y las tendencias de cambio de los bosques de mangle y otros humedales que sustentan los planes de manejo y conservación de estos ambientes, y de los medios ecológicos y económicos que proveen. (Berlanga & Ruiz, 2007).

En este sentido, los datos de Percepción Remota y el análisis de imágenes de satélite, al registrar de manera sinóptica y repetitiva las coberturas de la superficie terrestre en escalas locales y regionales constituyen una fuente de información de gran utilidad para el inventario y monitoreo de los ambientes costeros (Henderson, et al., 1999; Muttitanon & Tripathi 2005).

Debido a la relevancia que presentan los manglares a nivel mundial y nacional, es importante identificar los factores que provocan modificaciones en su estructura y pérdidas en su extensión. El



## Introducción.



objetivo de esta tesis es estimar la cobertura de manglar y el crecimiento de cultivos camaroneros en la Reserva de la Biósfera de Marismas Nacionales (RBMN), localizada en la costa sur de Sinaloa y norte de Nayarit, empleando métodos de Percepción Remota a partir una serie histórica de imágenes de satélite Landsat que comprende un periodo de 24 años (1990-2014).



## Antecedentes

En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios utilizando técnicas de Percepción Remota, así como de sensores espaciales para cartografiar los bosques de manglar. Dado que muchos de estos humedales costeros se localizan en zonas remotas, con frecuencia muy extensas y difíciles de atravesar, el uso de este tipo de datos puede proporcionar un método relativamente rápido, eficiente y económico para trazar mapas de los manglares. Además, muchos manglares están experimentando intensos cambios, principalmente de origen antropogénico (Valiela & York, 2001; Walters, et al., 2008). Entre los principales factores que contribuyen a la pérdida de bosque de manglar se encuentra el desarrollo de infraestructura de carreteras y canales que causa cambios en la hidrología natural de la zona costera, el crecimiento urbano, el uso del manglar para carbón y madera, la contaminación proveniente de las industrias y la agricultura, entre otras. Sin embargo una de las más recientes y significativas causas de pérdida de manglar en la última década, ha sido la creciente demanda en el consumo de camarón a nivel mundial y la correspondiente expansión de diferentes métodos destructivos de producción, representados por la construcción de los sistemas de granjas camaroneras a lo largo de las zonas costeras (Ducks Unlimited Inc., 2005).

Las granjas para cultivo de camarón que predominan en América Latina se han convertido en los últimos 15 años en una industria de exportación muy importante, pero con impactos significativos en el medio ambiente y en las comunidades costeras.

De las más de una docena de países en América Latina con experiencia en este cultivo, los principales países productores en esta región son: Ecuador, México y Honduras, con alrededor de 180,000, 20,000 y 14,000 hectáreas de granjas camaroneras desarrolladas, respectivamente (Tobey & Clay, 1998). En México el desarrollo de las granjas para la producción de camarón inicio en 1987, cuando se construyó el primer sistema de producción en el estado de Sinaloa. A partir de entonces, la





actividad se ha multiplicado dando lugar a que otros estados del país, se hayan sumado significativamente a esta actividad (Ducks Unlimited Inc., 2005).

Hasta la fecha la mayoría de las aplicaciones de sensores espaciales a la cartografía de manglares ha dependido de sensores ópticos convencionales, especialmente los de las series Spot y Landsat, dado a su bajo costo, amplia cobertura y facilidad de uso para estudios sobre manglares a corto y largo plazo (Beland, 2006). En México, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), con el proyecto “Los manglares de México: estado actual y establecimiento de un programa de monitoreo a largo plazo”, utiliza imágenes multiespectrales del satélite SPOT y Landsat, por lo que puede considerarse uno de los estudios más completos y precisos hasta el momento, así como los estudios realizados a nivel estatal, principalmente en estados como Sinaloa y Nayarit utilizando escenas Landsat. En estas áreas, los manglares se han visto afectados por el desarrollo de la agricultura, asentamientos humanos y el aumento de zonas para ganadería (Ruiz Luna & Berlanga Robles, 1999; Berlanga Robles & Ruiz Luna, 2002; Berlanga Robles & Ruiz Luna, 2006).





## Hipótesis

Verificar si existe una correlación entre la magnitud de la captura y crianza de camarón con la reducción o destrucción de manglares.

## Justificación

Identificar y cuantificar la superficie de área actual con mangle en las costas Sur de Sinaloa y Norte de Nayarit en la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales México (RBMN), debido a que el sistema ha estado expuesto a diversos impactos tanto de origen natural como antrópico en los últimos 24 años.

## Objetivos

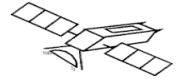
### Objetivo General

Estimar la cobertura espacial actual del bosque de mangle de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales (RBMN), en las costas de Sinaloa y Nayarit a partir de una serie histórica de imágenes de satélite Landsat en un periodo cercano de 24 años, aplicando técnicas de Percepción Remota.

### Objetivos Específicos

- Estimar la pérdida de cobertura del bosque de manglar de la RBMN, a través del método de Clasificación Supervisada con imágenes de satélite de los años 1990,2000 y 2014 del programa Landsat, sensores TM, ETM+ y OLI.
- Determinar el crecimiento de la industria camaronera de la RBMN en el periodo de estudio.
- Determinar la estructura forestal a través del método de Índices de Vegetación Normalizada (NDVI) de la RBMN.





- Generar mapas temáticos de la distribución del manglar y de cultivos camaroneros en la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales (RBMN) en el periodo de estudio.
- Determinar la fiabilidad de los mapas temáticos obtenidos por la clasificación supervisada por medio de la matriz de error.



## Capítulo ①. Acercamiento a Los manglares. Definición e Importancia.

### Definición de manglares

Los manglares son especies de bosques de plantas leñosas que se desarrollan en lagunas, riberas y en costas tropicales protegidas del oleaje. Debido a su ubicación costera siempre están en contacto con cuerpos de agua de origen marino, o en combinación con el agua que llega a través de escorrentías o por la desembocadura de los ríos. Entre las adaptaciones se encuentran, la tolerancia a altos niveles de salinidad, raíces aéreas en forma de zancos, (figura 1) que les permite anclarse en suelos inestables, semillas flotantes para mayor dispersión y estructuras especializadas que propician el intercambio de gases en el suelo anaeróbico del manglar (Ramírez, 2001).



Figura 1. Raíces de manglares en forma de zanco (CONABIO, 2009).

### Los manglares en el mundo

Los ecosistemas de manglar cubren aproximadamente entre 60% y 75% de la línea costera mundial y su distribución está limitada a aquellas zonas tropicales y subtropicales. Brasil, Indonesia y Australia son los países con mayor abundancia de manglares; México ocupa el sexto lugar (Contreras, 1985).





Todos los países latinoamericanos, tanto en las costas del Atlántico como en el pacífico, tienen manglares que cubren un total de 4 millones de hectáreas. Los países latinoamericanos con mayor abundancia de manglares son Brasil, Cuba y México con más de medio millón de hectáreas cada uno; y Colombia y Venezuela, cada uno con un cuarto de millón de hectáreas. Así mismo, todas las islas del Mar Caribe tienen manglares (Lacerda, et al., 1993).

Existen alrededor de 48 especies de árboles de mangle y estos pertenecen a diferentes familias botánicas reportadas en el mundo. En América se pueden encontrar ocho especies, mientras que en el hemisferio oriental existen hasta 40 especies (Tomlinson, 1986).

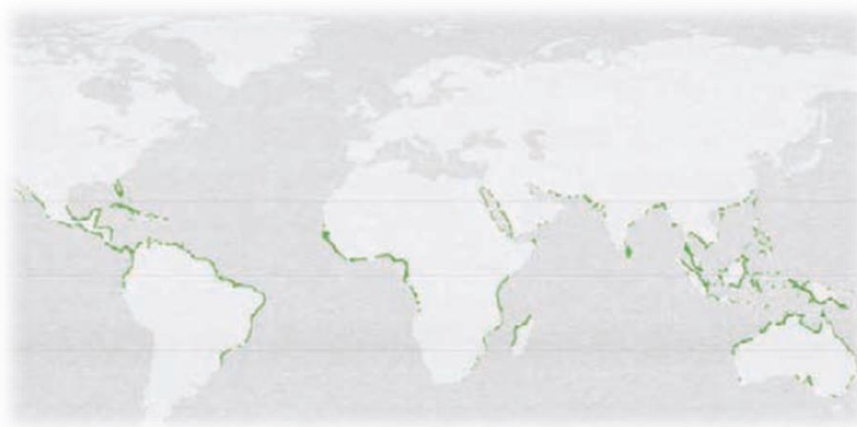


Figura 2. Distribución de los manglares en el mundo (CONABIO, 2009).

## Importancia de los manglares

Este ecosistema se destaca por su alta productividad y producción de materia orgánica. Promueven la biodiversidad ya que sus raíces sumergidas proveen hábitculo y refugio para una rica fauna de peces, mamíferos e invertebrados. Los manglares tienen un alto valor ecológico y económico, ya que actúan como criaderos para muchos peces y mariscos. Muchos de estas especies nacen en ecosistemas cercanos como praderas de yerbas marinas o arrecifes de corales y sus larvas juveniles se desarrollan bajo sus raíces. Por lo que son fundamentales para el hombre, ya que aseguran la





sustentabilidad de la industria pesquera. Albergan y proveen áreas de anidaje a un número considerable de especies de aves residentes y migratorias, vulnerables o en peligro de extinción. Atrapan sedimento y hojarasca entre sus raíces y ayudan a rellenar y recobrar terreno (Ramírez, 2001).



Figura 3. Biodiversidad marina asociada al manglar (CONABIO, 2009).

Los manglares brindan una gran variedad de bienes y servicios ambientales, como el control de inundaciones, protección contra huracanes y tormentas, así como control de contaminación del ecosistema (Constanza, 1997)

A pesar de la importancia que a nivel local y regional presentan los manglares, en las últimas décadas a nivel mundial estos han sido impactados por el crecimiento demográfico, la presión para la producción de alimentos, y el desarrollo industrial, urbano y turístico (Field, 1998).

### Problemas que enfrentan las comunidades de manglar a nivel mundial

Muchas de las actividades hechas por el hombre desde tiempos muy remotos han afectado al manglar en diferentes formas. Podemos mencionar algunas de ellas.





En Ecuador se han perdido grandes extensiones de bosques de manglar debido a la construcción de estanques para el cultivo de camarón y en algunos casos, se han eliminado más de 90% de ellos, como por ejemplo, en la Bahía de Caraquez (Twilley, 1977). En Panamá, la mitad de los manglares han desaparecido en los últimos treinta años. En la Guyana Francesa se han destruido manglares para el cultivo del arroz (Lacerda, 1993).

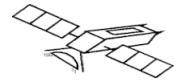
En todos los países Latinoamericanos la madera de mangle se utiliza como leña. Otras amenazas para los manglares son los proyectos costeros de ingeniería, como ha sucedido en el norte de Colombia, la construcción de caminos y viviendas, y el desagüe a manglares de aguas de drenaje e industriales. Los derrames de petróleo, ocurridos por exploración o transporte como ocurre en Panamá y México, son particularmente dañinos para el manglar. En Rio de Janeiro, Brasil, la construcción de presas que desvían el flujo de agua dulce a sistemas de manglar, ha provocado la degeneración de todo un ecosistema de manglar (Lacerda, 1993). De manera similar, los manglares de Asia han sufrido de severas deforestaciones para hacer campo a la agricultura, acuicultura y desarrollos urbanos (Primavera, 2000; Zan, 2003).

## Impacto ambiental por la destrucción de mangle

En general los manglares pueden estar sujetos a impactos naturales como antrópicos, dentro de los naturales se encuentran los huracanes, inundaciones y tsunamis y en los antrópicos se encuentran los cambios de uso de suelo (Berlanga, 2006) que pueden llegar a afectar la estructura de las comunidades de manglar afectando las alturas, los diámetros y densidades de los individuos e incluso provocar las pérdidas en su cobertura. (Kovacs, 1999).

Las actividades desmedidas, sin el manejo adecuado, traen como consecuencia la destrucción, degradación del ecosistema y la pérdida de hábitat críticos para muchas especies de importancia comercial. La erosión de las costas aumenta y pone en peligro otros ecosistemas como los arrecifes





de coral y praderas submarinas. Efectos dañinos en la vida acuática, cambios en la diversidad de las especies y la reducción en la productividad son algunas de las secuelas y el resultado directo de la falta de un plan de manejo. Sin embargo, en las últimas décadas se ha llevado a cabo investigaciones que han demostrado la importancia de conservarlos y regular sus usos (Ramírez, 2001).

### Relación entre los manglares y la producción pesquera

En las costas bordeadas por los manglares se encuentran además de poblaciones nativas, numerosos organismos marinos en etapas juveniles que pasan solamente una parte de su vida en este hábitat. Aquí encuentran la protección y abundante alimentación, que les garantiza un rápido crecimiento y una exitosa subsistencia. Estos organismos están protegidos por la gran cantidad de raíces de mangle que les sirve de refugio. También por un eficiente e importante flujo de energía, que va del manglar hacia las zonas costeras, en forma de detritus orgánicos (materia orgánica en proceso de descomposición, rico en contenido calórico, proteico y carga microbiana (Odum, 1975)) derivados de las hojas caídas de los manglares, les garantiza un amplio recurso alimenticio. Estas hojas, que permanentemente caen desde el manglar, al principio no sirven como alimento debido a que la lignina y la celulosa que las componen resultan indigeribles para la mayor parte de los animales marinos. Sin embargo, la acción bacteriana y de los hongos en el agua, convierten esta materia indigerible en una fuente de gran importancia para la fauna marina asociada al manglar (Heald & Odum, 1970).

La importancia del manglar para las pesquerías no radica en la biomasa total que puede obtener capturando organismos que habitan el manglar sino el papel que juegan los manglares como zonas de crianza, refugio y alimentación para organismos que después se reclutaran en bancos pesqueros.



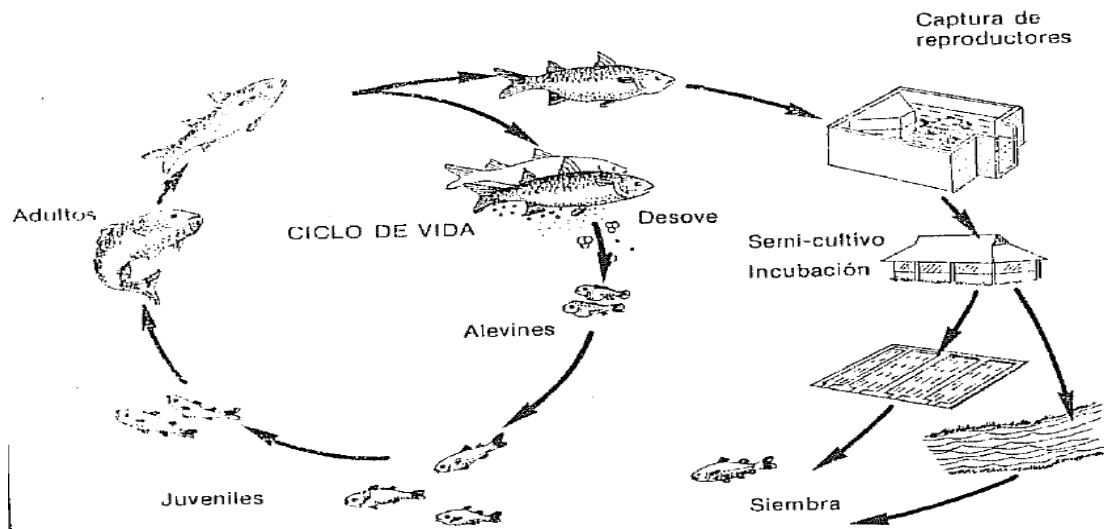


Figura 4. Siembra y repoblación de embalse y cuerpos de agua como forma de acuicultura en sistemas semicontrolados (Aguilera Hernández).

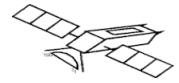
Hoy día se sabe que existe una correlación estadística verdadera y directa entre la cantidad de costas bordeadas por manglares y la producción pesquera. La disminución de este borde de manglares irremediamente se transforma en pérdidas en la producción pesquera de la región (Berlanga, 2006).

## Importancia del manglar para la actividad camaronera

Algunas especies de camarones se encuentran en los manglares y estuarios durante su vida juvenil. De estos camarones, las especies que se conocen como "Camarones blancos" son las más abundantes. Estos camarones llegan a las zonas costeras bordeadas por manglares en forma de post larva, después del desove ocurrido en aguas más profundas, y se mantienen en los estuarios y manglares por espacio de cuatro a cinco meses; luego inician una migración hacia las zonas marinas donde terminan su desarrollo. El desove de estos camarones ocurre en mayor o menor intensidad durante todo el año, de manera que la presencia de estas especies en los manglares y estuarios es permanente.







## Significado y alcances de la acuicultura

El termino acuicultura, significa:

“Todo tipo de cultivo de animales y plantas acuáticas, en agua dulce, salobre o marina”, se refiere al uso de métodos y técnicas para el manejo y control de los organismos cuyo hábitat es el agua, hasta su cosecha, procesamiento, comercialización y consumo (Aguilera Hernández).

En un sentido más amplio, la acuicultura está concebida como una actividad orientada a la creación de unidades de producción. De ello se desprenden que es una actividad interdisciplinaria que va desde la selección y manejo de organismos reproductores y producción de crías, hasta el consumo.

Desde el punto de vista biológico, la acuicultura es el intento del hombre por incrementar la productividad de los recursos acuáticos mediante la manipulación deliberada de sus procesos fisiológicos de crecimiento, reproducción y mortalidad, haciendo uso de insumos como alimento energía y obra.

Por otro lado, permite revalorizar diversos recursos orgánicos al transformarlos en valiosos alimentos, que de otra manera serían considerados como desperdicios y por lo tanto desaprovechados. Tal es el caso de las excretas animales, desperdicios agrícolas, ciertos residuos agroindustriales e incluso los drenajes municipales domésticos.

## Principales ramas de la acuicultura

Según el grupo taxonómico de las especies que se cultivan, la acuicultura se puede dividir en diversas especialidades, tales como:

- Piscicultura (cultivo de peces)





- Camaronicultura (cultivo de camarones)
- Ostricultura (cultivo de ostras)
- Cultivo de almejas
- Cultivo langostino

Cada especialidad requiere las técnicas específicas de manejo y cultivo, en función de las características fisiológicas, morfológicas y de comportamiento que cada especie posee. De igual forma, dichas técnicas están en función de las características fisicoquímicas y ambientales en las que las especies puedan desarrollarse eficientemente.

### Impacto de los cultivos camaroneros en los manglares a nivel mundial

Los impactos potenciales de esta actividad al medio ambiente están relacionados con la ubicación en donde se construye la granja y el diseño que se utiliza para tal obra (Tabla 1); lo que está marcando los efectos que se presentaran sobre el medio natural y los diferentes elementos del paisaje, ya que es evidente la ubicación sistemática de las granjas en ecosistemas frágiles, particularmente afectando los ecosistemas de manglar por esta actividad.

Los efectos ambientales que están asociados a la construcción y operación de las granjas camaroneras, incluye:

- Salinización de los suelos e intrusión de agua salada en los acuíferos de agua dulce.
- Asentamiento de tierras por la extracción del agua subterránea.
- Cambios importantes en la hidrología de la zona costera.
- Destrucción de hábitats de importancia para especies de fauna silvestre.





- Descarga de efluentes con desechos ricos en nitratos y fosfatos, además de productos químicos que son usados para el control de enfermedades, desinfección y estimulantes de crecimiento.
- Introducción de especies de camarón exóticas y las posibles incidencias de enfermedades en el ecosistema.
- Pérdida de vegetación de manglar, por efectos directos e indirectos.

Imagen	Actividad	Etapa
	<p>Inicio del secado, desinfección y mantenimiento de un drene.</p>	<p>Secado de estanques y reservorio</p>
	<p>Utilización de bombas para el drenado de un estanque</p>	<p>Secado de estanques y reservorio</p>
	<p>Secado correcto de un estanque</p>	<p>Secado de estanques y reservorio</p>
	<p>Limpieza del drene interior, nótese al fondo una compuerta de salida que puede ser utilizada para tratar el agua antes de desecharla al medio ambiente.</p>	<p>Mantenimiento de los drenes</p>

Tabla 1. Recomendaciones para la operación de las granjas de cultivo de camarón (Jiménez & Ibarra, 2001).





Este último punto es muy importante, ya que está estimado que en los últimos 10 a 20 años, las granjas camaroneras han tenido un impacto significativo en la destrucción de los ecosistemas de manglar. Globalmente las granjas para la producción de camarón pueden ser las responsables del 10% al 25% de la pérdida de manglares ocurrida desde 1960 (Clay, 1996). Se ha estimado que 765,500 ha de manglares han sido taladas para la acuicultura (principalmente del camarón) de los cuales 639,000 ha pertenecen a Asia solamente (Phillips, et al. 1939). En regiones en donde la acuicultura del camarón han llegado a ser importantes, se ha estimado que del 20% al 25% de la reciente destrucción de manglar es debida al desarrollo de las granjas camaroneras (NACA, 1994).

## Los manglares en México

En México se pueden encontrar cuatro especies de manglar: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (Arreola Lizárraga, et al., 2004).



Figura 5. Distribución de los manglares en México (CONABIO, 2009).





El mangle rojo es pionero en la fijación de suelos costeros, por lo que se distribuye en la interfase mar y tierra, y permite el establecimiento de otras especies de mangle en las planicies lodosas interiores del pantano. Las otras especies de mangle carecen de raíces zancudas y no pueden sobrevivir a la erosión de las olas en los bordes del bosque. Así, las distintas especies se complementan en sus nichos ecológicos: el mangle rojo fija el borde del bosque y lo protege de la erosión de las olas, y el blanco y el negro cubren con sus copas y raíces las planicies lodosas de la laguna protegiéndolas de la erosión de las tormentas tropicales (Calderón, et al., 2008).

### La camaronicultura en México.

La camaronicultura inició en México hace menos de un siglo, pero en los últimos 30 años es cuando ha presentado un desarrollo económico significativo, pues representa una importante alternativa de negocio que brinda el sustento de 80 mil personas aproximadamente. La actividad pesquera y de cultivo son mucho más productivas en la costa del Pacífico (70%) que en la del Atlántico (30%), pero en ambos casos han tenido un crecimiento franco a lo largo de las últimas dos décadas (Calderón, et al., 2009). El camarón es la tercera pesquería en volumen, pero la número uno en valor monetario a nivel nacional. La producción anual de camarón se ha duplicado en los últimos 15 años; aun cuando la pesca ha disminuido paulatinamente, el cultivo ha ido ganando terreno, hasta conformar más de 60% de la producción total. La propagación a gran escala de granjas camaroneras ha sido facilitada en gran parte por el apoyo financiero internacional, brindado principalmente por el Banco Mundial y el Banco Asiático de Desarrollo. Entre 1997 y 2000, la Corporación Financiera Internacional aprobó préstamos por alrededor de 82 millones de dólares para el desarrollo de la acuicultura en América Latina; entre los países beneficiados se encuentra México. No obstante, las modificaciones antropogénicas realizadas en un sistema, como los patrones de circulación del agua marina y dulce, pueden provocar la desecación parcial de lagunas con comunicación intermitente al mar y la mortandad de manglares. Ejemplo de esto fue la apertura del canal Cuautla, en el estado de Nayarit, lo que provocó la mortalidad de 18% del bosque de mangle (Calderón, et al., 2009).



## Capítulo ②. Principios de la Percepción Remota.

### Definición de Percepción Remota

La Percepción Remota es una ciencia técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales, estamos asumiendo que entre suelo y sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía o de un haz energético artificial. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor sea almacenado convenientemente, bien a bordo del satélite, bien en las estaciones receptoras, de cara que pueda interpretarse para una determinada aplicación (Chuvienco Salinero, 2008).

### Elementos que interactúan en la Percepción Remota

Un sistema de Percepción Remota es el conjunto de varios elementos que se describen de la siguiente manera (Chuvienco Salinero, 2008):

1. *Fuente de energía.* Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por este (Teledetección activa). La fuente de energía más importante es la energía solar.
2. *Cubierta terrestre.* Formada por las distintas masas de vegetación, suelos, agua o elementos antropogénicos, que reciben la señal energética y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
3. *Sistema sensor* (sensor remoto). Compuesto por el sensor 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. Existen tres formas por las que el sensor puede adquirir información (Figura 6):

- (i) Reflexión debida a un haz luminoso (Sol).
- (ii) Emisión de la energía propia del objeto.
- (iii) Emisión de luz del sensor para la posterior captación por reflectancia. (emisión y reflexión).

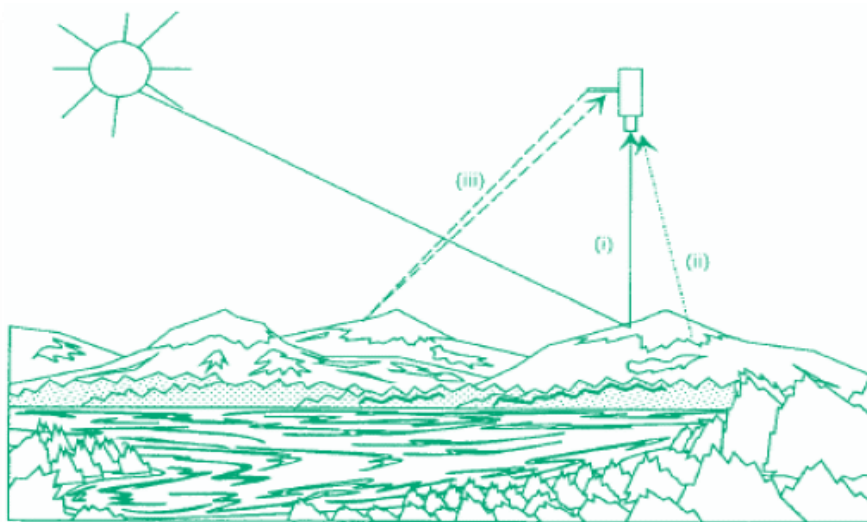


Figura 6. Formas de Percepción Remota (Chuvienco Salinero, 2008).

4. *Sistema de recepción y 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 interesados.
5. *Interprete que analiza esta 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.
6. *Usuario final.* Encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que del mismo deriven.



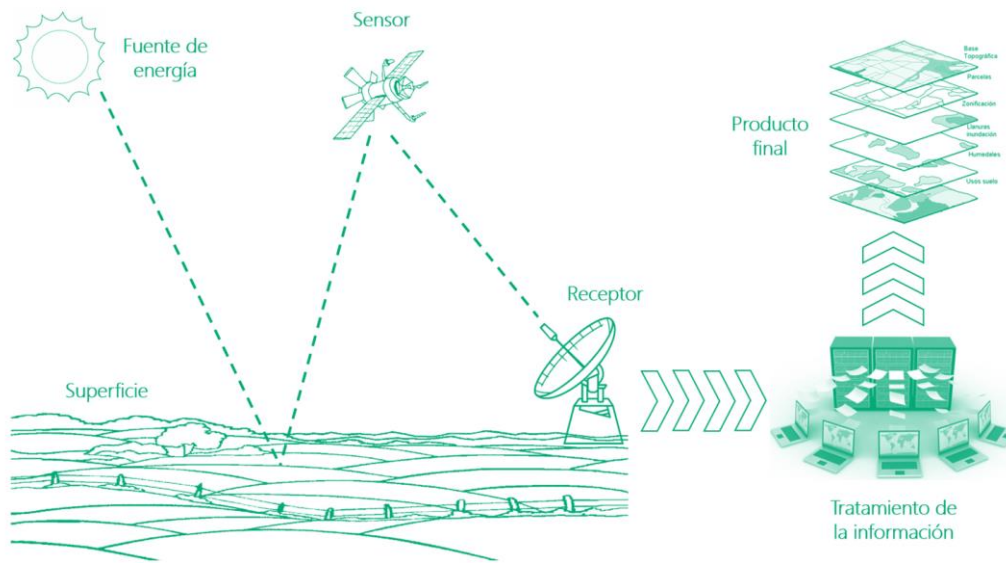


Figura 7. Elementos que interactúan en la Percepción Remota (*elaboración propia*).

## Principios físicos de la Percepción Remota

Anteriormente se definió la Percepción Remota como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre.

Para comprender el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética. Como es sabido, la energía se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: *convección*, *conducción* y *radiación*. De ellos, nos centraremos en la radiación, pues constituye la base de los sistemas de la Percepción Remota.

Los fundamentos de la Percepción Remota se abordan históricamente a través de la explicación de dos teorías aparentemente contrapuestas; aquella que la concibe como un haz ondulatorio (*Huygens* y *Maxwell*), y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, Fotones o cuantos, con masa igual a cero (*Planck* y *Einstein*). Actualmente, parece que las dos teorías







se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz presenta comportamientos que pueden explicarse de acuerdo a ambos planteamientos (Chuvienco Salinero, 2008).

Para la teoría ondulatoria, la radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio de propagación en el que actúan dos campos perpendiculares: el magnético y el eléctrico. Esta teoría se explica sobre la base de dos conceptos fundamentales que son la *longitud de onda* y la *frecuencia* (Figura 8).

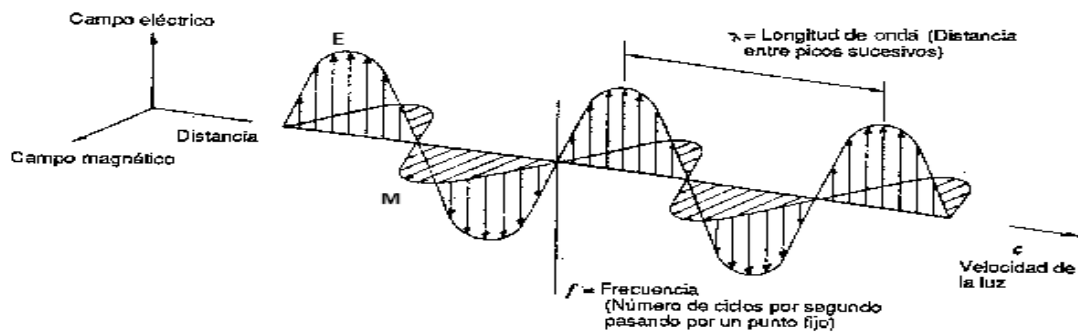


Figura 8. Vectores de los campos eléctrico (E) y magnético (M) de la radiación electromagnética (ITC, 2004).

La fórmula esencial en la que se sustentan estas teorías es la siguiente:

$$c = \lambda * F$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación de la luz (una constante), siendo  $\lambda$  y  $F$  la longitud de onda y la frecuencia respectivamente. De esta fórmula se deduce que longitudes de onda pequeñas tendrán altas frecuencias y viceversa.

Por otra parte la teoría cuántica nos explica el fenómeno de la radiación electromagnética basándose en sus propiedades energéticas siendo la fórmula esencial siguiente:

$$Q = h * F$$





Donde  $Q$  es la cantidad de energía transportada por una onda,  $h$  es una constante (la constante de Planck) y  $F$  es la frecuencia.

Despejando  $F$  en la fórmula precedente y sustituyendo nos encontraríamos con la siguiente expresión:

$$Q = h \left( \frac{c}{\lambda} \right)$$

Del análisis de esta expresión se deduce que a medida que trabajemos con longitudes de onda mayores, sus contenidos energéticos serán menores y por tanto habrá más dificultades para la detección de estas radiaciones.

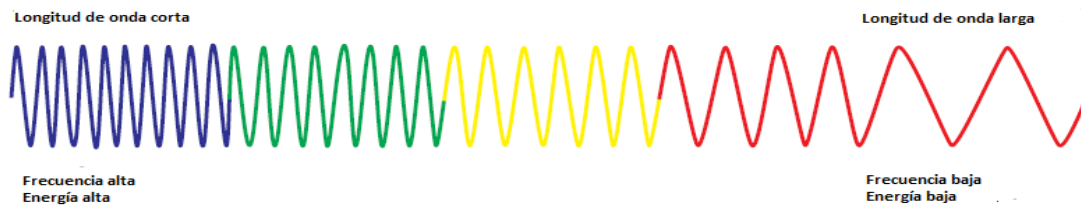


Figura 9. Relación entre longitud de onda, frecuencia y energía. (ITC, 2004).

### ***Espectro electromagnético.***

De las fórmulas anteriores, se deduce que podemos definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia (Figura 10). Aunque la sucesión de valores de la longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina *espectro electromagnético* (Figura 11). Comprende desde las longitudes de más cortas (rayos gamma, rayos X), hasta las kilométricas (telecomunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micrómetros, mientras las más largas se miden en centímetros o metros. La siguiente tabla (Tabla 2) muestra las principales divisiones del espectro electromagnético.



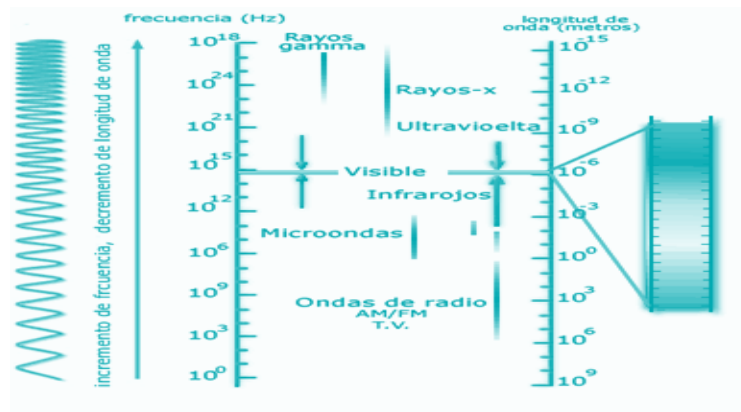


Figura 10. Relación entre longitud de onda, frecuencia con el espectro electromagnético (ITC, 2004).

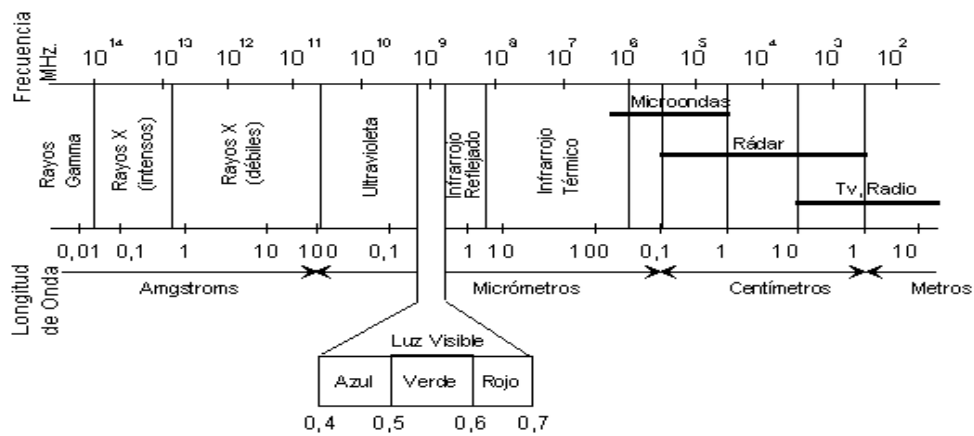


Figura 11. Espectro electromagnético (Chuvieco Salinero, 2008).

BANDA	LONGITUD DE ONDA
Rayos Gamma	<0.03 nm
Rayos X	0.003 nm – 3nm
Ultravioleta	3 nm – 0.40 μm
Espectro visible	
- Azul	0.4 μm – 0.5 μm
- Verde	0.5 μm – 0.6 μm
- Rojo	0.6μm – 0.7 μm
Infrarrojo Cercano	0.7 μm – 1.3 μm
Infrarrojo Medio	1.3 μm – 8 μm
Infrarrojo Lejano	8 μm – 14 μm
Microondas	1 mm -30 cm
Radio	>30 cm

Tabla 2. Principales divisiones del espectro electromagnético (Chuvieco Salinero, 2008).





Las bandas más utilizadas para la realización de algún estudio en Percepción Remota son el espectro visible, la infrarroja y la microondas. La región visible proporciona información concerniente a las características del agua, mientras que la región del infrarrojo define las fronteras entre los cuerpos de agua y el suelo (Tabla 3).

Banda	Características
Espectro visible: (0.4 a 0.7 $\mu\text{m}$ ).	Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que percibe el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales que se denominan banda azul (0.4 -0.5 $\mu\text{m}$ ), banda verde (0.5-0.6 $\mu\text{m}$ ) y banda roja (0.6- 0.7 $\mu\text{m}$ ).
Infrarrojo cercano: (0.7 a 1.3 $\mu\text{m}$ ).	Se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de películas dotados de emulsiones especiales. Esta banda es especialmente importante para la detección de zonas con vegetación 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 térmico: (3 a 14 $\mu\text{m}$ ).	Después de los 3 $\mu\text{m}$ la radiación infrarroja emitida por la superficie se capta en forma de calor, por lo que la cantidad y longitud de onda de las radiaciones es absorbida por la atmosfera, como el CO <sub>2</sub> o vapor de agua, pero existe un espacio de transmisión entre los 8 y 14 $\mu\text{m}$ , que es donde los sensores de los satélites pueden captar esa emisión.
Microondas (1 mm en adelante).	Este es un tipo de energía es capaz de penetrar en las nubes, niebla y lluvia. Sirve para describir la rugosidad de alguna superficie.

Tabla 3. Descripción de las bandas espectrales usadas en Percepción Remota (Chuvienco Salinero, 2008).





## Interacciones de la atmósfera con la radiación electromagnética

La atmósfera es el medio por donde viaja el flujo de radiación de la superficie terrestre al sensor. La interacción con ciertos gases causa efectos de absorción y dispersión que interfieren con la transmisión del flujo de energía (Figura 12).

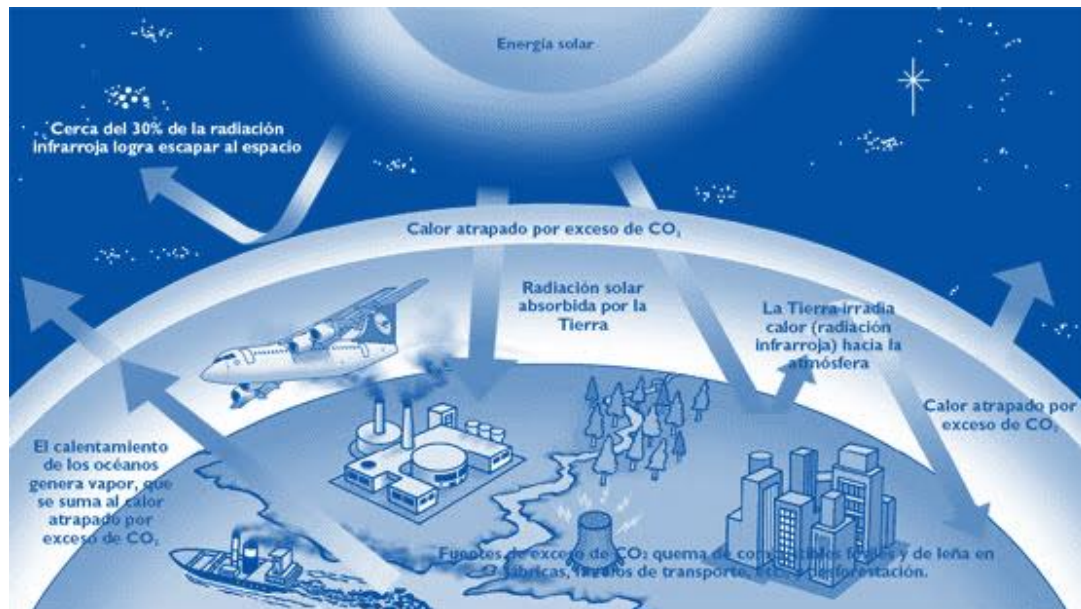


Figura 12. Principales interacciones de la atmósfera con la radiación electromagnética. (ITC, 2004).

Los efectos de la atmósfera sobre la radiación electromagnética pueden variar por las diferentes distancias de recorrido, la intensidad de la señal emitida, la longitud de onda y las condiciones atmosféricas del momento de la observación.

## Absorción Atmosférica

La atmósfera tiende a comportarse como un filtro con ciertas longitudes de onda, de tal forma que algunas bandas del espectro no son captadas eliminando la posibilidad de hacer un análisis en Percepción Remota. Los principales gases causantes del efecto de absorción en la atmósfera se muestran en la Tabla 4.





Gas	Efectos
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	Filtra las radiaciones ultravioletas por debajo de 0.1 $\mu\text{m}$ , pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las microondas.
Ozono (O <sub>3</sub> )	Elimina la radiación ultravioleta inferior a 0.3 $\mu\text{m}$ , así como un sector aproximado de 27 mm de microondas.
Vapor de agua	Absorbe ondas en torno a los 6 $\mu\text{m}$ y otras menores entre 0.6 y 2 $\mu\text{m}$ .
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Absorbe el infrarrojo térmico hasta 15 con efectos importantes en el infrarrojo medio desde 2.5 $\mu\text{m}$ hasta 4.5 $\mu\text{m}$ .

Tabla 4. Gases causantes del efecto de absorción en la atmósfera (Chuvienco Salinero, 2008).

Como consecuencia de esta absorción la observación se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas en donde la trasmisividad de la atmósfera es suficientemente alta. Es decir, son aquellas bandas del espectro con longitudes de onda en donde la mayoría de la radiación puede atravesar (Figura 13).

Estas ventanas facilitan el proceso de recolección de datos y el diseño de sensores espaciales se ajusta a estas bandas para evitar interferencias que nos impidan conservar un objeto o fenómeno. Las principales ventanas atmosféricas son:

- Espectro visible e infrarrojo cercano, situada entre 0.3 y 1.35  $\mu\text{m}$ .
- Infrarrojo medio de 1.5 a 1.8  $\mu\text{m}$ , 2.0 a 2.4  $\mu\text{m}$ , 2.9 a 4.2  $\mu\text{m}$  y 4.5 a 5.5  $\mu\text{m}$ .
- Infrarrojo térmico entre 8 y 14  $\mu\text{m}$ .
- Microondas por encima de 200  $\mu\text{m}$ , la atmósfera es prácticamente transparente.

Incluso, si en el proceso de recolección de datos se usan las ventanas atmosféricas, este se ve interferido hasta cierto punto por la dispersión y la absorción de la atmósfera. Por eso, los datos deben ajustarse posteriormente mediante una manipulación digital (Chuvienco Salinero, 2008).



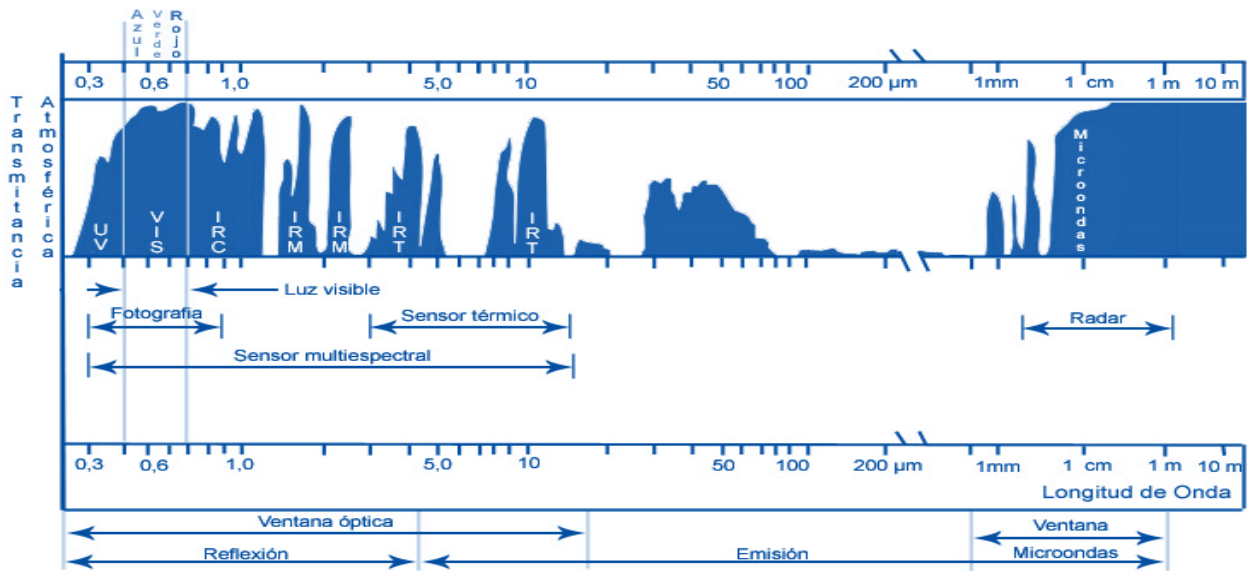


Figura 13. Ventanas atmosféricas. Tomado de Lillesand & Kiefer. Remote sensing and image interpretation.

### Dispersión atmosférica.

La dispersión de la radiación electromagnética es causada por su interacción con los gases, partículas atmosféricas en suspensión o gotas de agua. Esta interacción da un aporte adicional a la radiación proveniente de la superficie terrestre. Los principales tipos de dispersión atmosférica se presentan en la Tabla 5.

Dispersión	Se presenta	Molécula de dispersión
Rayleigh	Cuando la longitud de onda de la radiación es más grande que el diámetro de las moléculas de gas responsables de la dispersión.	Diversos gases de la atmósfera
Mie	Cuando la longitud de onda de radiación es similar al tamaño de la partícula responsable de la dispersión.	Vapor de agua, polvo, aerosoles
No selectiva	Cuando la longitud de onda de la radiación es más pequeña que el diámetro de la partícula.	Agua

Tabla 5. Principales tipos de dispersión presentes en la atmósfera (Chuvieco Salinero, 2008)





## Emitancia espectral de un cuerpo negro a distintas temperaturas.

Es conveniente estudiar algunas de las leyes de la radiación electromagnética, ya que son útiles para caracterizar espectralmente los tipos de objetos en la superficie terrestre.

La energía registrada por un sensor depende de factores intermedios, uno de los más importantes y de los cuales se han establecido distintas fórmulas es la temperatura de los objetos en la superficie terrestre. Para la realización de los cálculos la Percepción Remota considera el cuerpo negro como un sistema de medición que permite encontrar el comportamiento de los cuerpos reales. Un cuerpo negro es un objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe, es decir un emisor perfecto.

La *Ley de Planck* establece que cualquier objeto por encima del cero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) radia energía, y que esta aumenta conforme a la temperatura. A partir de lo anterior, se han construido curvas de emitancia de los cuerpos negros a distintas temperaturas que nos permiten identificar el comportamiento de un objeto en función de su temperatura (Chuvienco Salinero, 2008). Por ejemplo, si tomamos la temperatura promedio de la tierra en  $27^{\circ}\text{C}$  la gráfica nos muestra la curva de radiancia espectral de un cuerpo negro a la temperatura de la tierra en 300 K, permitiendo establecer en que longitudes de onda se encuentra más próximo (Figura 14).

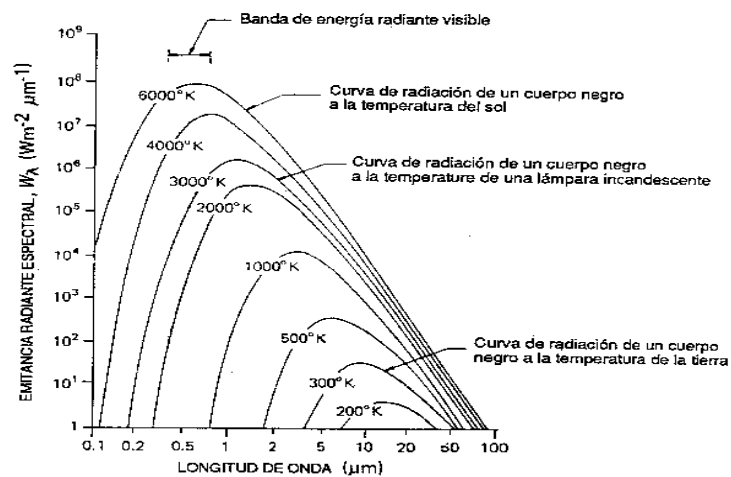


Figura 14. Emitancia espectral de un cuerpo negro a distintas temperaturas (Chuvienco Salinero, 2008)







La Ley de Desplazamiento de Wien nos permite calcular la longitud de onda en donde un cuerpo negro emite su máxima energía en función de su temperatura y queda establecida de la siguiente manera:

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \mu m K}{T}$$

Donde T es la temperatura en grados kelvin y  $\lambda_{max}$  es la longitud de onda del pico de emisión en micrómetros.

La importancia de esta ley es que permite seleccionar la banda más conveniente para detectar un objeto o fenómeno a determinada temperatura, lo cual ayuda a identificar cubiertas terrestres.

### Terminología y unidades de medida

Para que pueda producirse una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de esta. Este flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de, o dirigida a una unidad de superficie y con una dirección concreta. Las unidades de medida más empleadas en Percepción Remota con sus respectivas unidades de medición se explican en la Tabla 6.

CONCEPTO		SIMBOLO	UNIDAD
Energía radiante	Indica el total de energía radiada en todas direcciones	Q	Julios (J)
Densidad radiante	Total de energía radiada en todas direcciones por unidad de volumen	W	J/m <sup>3</sup>
Flujo radiante	Total de energía radiada en todas direcciones por unidad de tiempo	Φ	Vatios (W)
Emitancia radiante	Total de energía radiada en todas direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo	M	W/m <sup>2</sup>





CONCEPTO		SÍMBOLO	UNIDAD
Emitancia radiante espectral	Total de energía radiada en todas direcciones desde una unidad de área de una determinada longitud de onda y por unidad de tiempo	$M\lambda$	$W/m^2\mu m$
Irradiancia	Total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo	E	$W/m^2$
Irradiancia espectral	Total de energía radiada sobre una unidad de área de una determinada longitud de onda y por unidad de tiempo.	$E\lambda$	$W/m^2\mu m$
Intensidad radiante	Total de energía radiada por unidad de tiempo y por un ángulo tridimensional referente a la sección completa de la energía transmitida.	I	W/sr
Radiancia	Total de energía radiada por unidad de área y por un ángulo de medida	L	$W/m^2 sr$
Radiancia espectral	Total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por un ángulo de medida.	$L\lambda$	$W/m^2 sr \mu m$
Emisividad	Relación entre la emitancia de una superficie y la de un emisor perfecto a la misma temperatura.	$\epsilon$	1
Reflectividad	Relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie.	$\rho$	1
Absortividad	Relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.	$\alpha$	1
Transmitividad	Relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.	$\tau$	1

Tabla 6. Términos y unidades de medida (Chuvienco Salinero, 2008).

## Sensores

Un sensor remoto es, un instrumento tecnológico cuya función es captar imágenes a distancia. Los diferentes sensores están diseñados para captar información de las diferentes regiones del espectro





electromagnético, cada una de estas regiones se denomina canal o banda. Generalmente son desarrollados para operar en la banda infrarroja y en la microondas (Kerle, 2004).

## Tipos de sensores

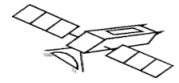
Pueden clasificarse de acuerdo al procedimiento de recibir la energía procedente de distintas cubiertas, se habla de sensores pasivos y sensores activos.

## Sensores pasivos

No emiten ningún tipo de energía, se limitan a detectar la radiación electromagnética reflejada o emitida de fuentes naturales de energía, en este caso el Sol. (Kerle, 2004). Algunos ejemplos de este tipo de sensor son de los programas Landsat, Spot, CBERS, IKONOS y Quickbird. A su vez estos pueden dividirse en:

- Sensores fotográficos.
  
- Óptico electrónicos
  - a. Exploradores de barrido
  - b. Exploradores de empuje
  - c. Tubos de Vidicón
  
- De antena
  - a. Radiómetros de microonda





## Sensores Activos

Detectan la respuesta reflejada por objetos (o la superficie terrestre en general) a los que se les suministra energía generada artificialmente por el mismo sensor. Estos sistemas tienen la ventaja de poder operar en horarios nocturnos o superficies con cobertura nubosa. Los más utilizados son el Radar y Lidar, (Kerle, 2004). algunos ejemplos de estos sensores son los programas RADARSAT, JERS, ERS Y SIR.

### *Radar*

Es un radiómetro activo, trabaja en la banda de microondas entre 0.1 cm y 1 m. Gracias a su flexibilidad puede trabajar en cualquier condición atmosférica. Su desventaja es que tiene una baja resolución espacial, debido al escaso diámetro de la antena.

### *Lidar (Light Detection and Ranging)*

El Lidar trabaja de manera similar al radar pero con tecnología láser, dicho laser emite pulsos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano. (Kerle, 2004).

## Tipos de resolución en de un sensor.

La resolución de un sensor es la habilidad para registrar y discriminar la información a detalle, esta depende del efecto combinado de sus distintos componentes, de esta manera, Chuvieco (2008) describe cinco tipos de resolución que combinadas mejoran la calidad de la imagen, dichas resoluciones son: espacial, radiométrica, espectral, temporal y angular.





*Resolución espacial.* Se utiliza para designar el objeto más pequeño que puede ser registrado por el sensor. En una imagen de satélite corresponde al tamaño del pixel el cual es considerado como el objeto mínimo dentro de la imagen: la resolución espacial de un sensor óptico electrónico depende de varios factores, tales como la altura de la órbita, la velocidad de exploración y número de detectores.



Figura 15. Diagrama que muestra el tamaño de pixel de imágenes pancromáticas y multispectrales de los satélites SPOT Y LANDSAT.(Inegi, 2015).

*Resolución radiométrica.* Indica la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia. La energía electromagnética recibida por el sensor, cuando se convierte a nivel digital, necesita un formato binario (número de bits) para codificarse. A mayor número de bits reservados para almacenar el valor de la reflectividad de un pixel, mayor resolución radiométrica.

*Resolución espectral.* Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. A la vez, conviene que esas bandas sean suficientemente estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro.





Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que pueden encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés.

*Resolución temporal.* Este concepto se refiere a la frecuencia con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de la cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura.

*Resolución angular.* Por ella se entiende la capacidad que tiene un sensor para tomar imágenes oblicuas. Esta propiedad permite no solamente acortar los ciclos temporales de recubrimiento, sino que posibilita la generación de imágenes estereoscópicas y por lo tanto la reconstrucción del relieve.

## El programa Landsat

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjugadas por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que inicio en 1972, es la más larga de la historia y continua registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio, proporcionando más de 42 años de datos calibrados. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra. En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM), Para el análisis de este estudio nos enfocaremos solamente en los sensores TM, ETM+ y OLI



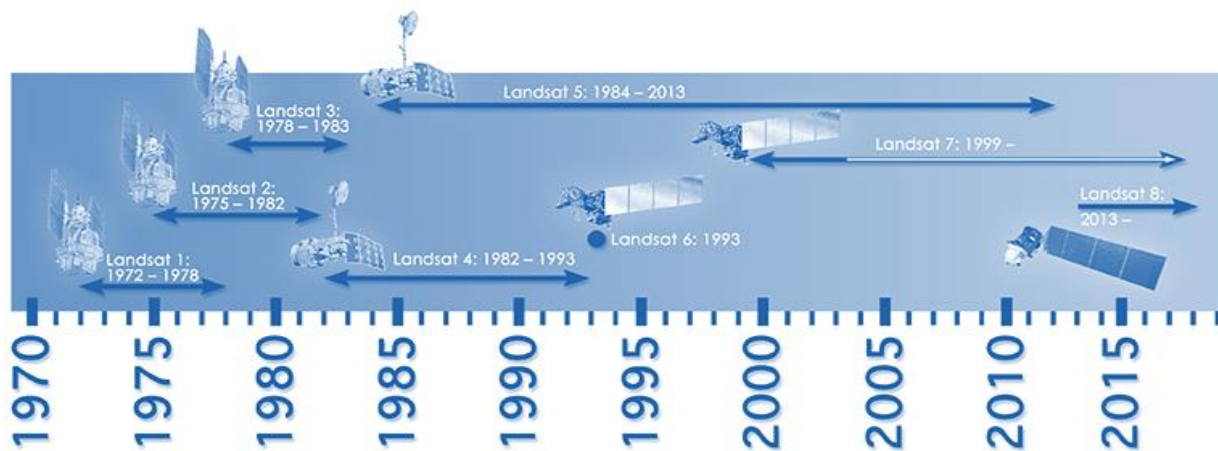


Figura 16. Cronología del programa Landsat (*Landsat Science, 2015*).

\* La pequeña flecha blanca en el Landsat 7 indica la recogida de datos sin el Line Corrector de Escaneo.

\*\* Landsat 8 lanzado con éxito el 11 de febrero de 2013 y el archivo de datos del Landsat continúa expandiéndose.

Programa	Características
Landsat 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fecha de lanzamiento: 01 de marzo 1984.</li> <li>Estado: Instrumento MSS apagado en agosto de 1995 y el programa Landsat 5 dado de baja en junio de 2013.</li> <li>Sensores: TM, MSS.</li> <li>Altitud: 705 kilómetros.</li> <li>Inclinación: 98.2°.</li> <li>Orbita: Polar, heliosincrona.</li> </ul>
Landsat 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fecha de lanzamiento: 15 de abril 1999.</li> <li>Estado: En operación a pesar de Scan Line Corrector (SLC), fracaso en 31 de mayo de 2003.</li> <li>Sensores: ETM+.</li> <li>Altitud: 705 kilómetros.</li> <li>Inclinación: 98.2°.</li> <li>Orbita: Polar heliosincrona.</li> </ul>
Landsat 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fecha de lanzamiento 11 de febrero 2013.</li> <li>Estado: Operacional.</li> <li>Sensores: OLI, TIRS.</li> <li>Altitud: 705 kilómetros.</li> <li>Inclinación: 98.2°.</li> <li>Orbita: Polar, heliosincrona.</li> </ul>

Tabla 7. Características del Programa Landsat 5, 7 y 8 (*Landsat Science, 2015*).



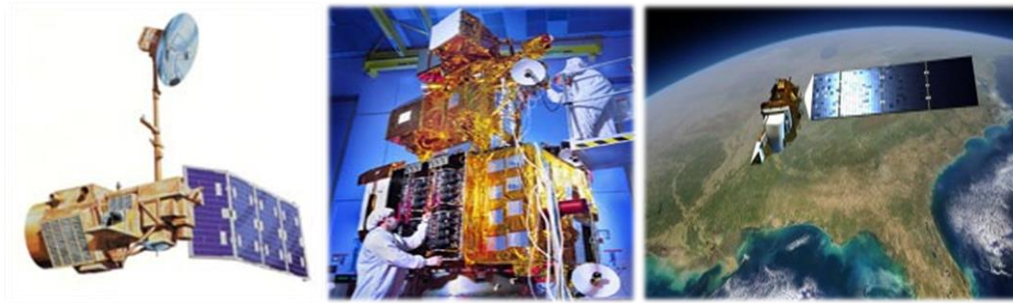


Figura 17. Imagen del Programa Landsat-5, Landsat-7 y Landsat-8 (*Landsat Science, 2015*).

Plataforma Sensor	Resolución Espectral ( $\mu$ )	Resolución Espacial (m)	Resolución Temporal (Días)	Resolución Radiométrica (Bits)	Área de Cobertura (km)
Landsat-5 TM Thematic Mapper	B1: 0.45-0.52 (visible-azul) B2: 0.52-0.60 (visible-verde) B3: 0.63-0.69 (visible rojo) B4: 0.76-0.90 (IR cercano) B5: 1.55-1.75 (IR medio) B6: 10.4-12.5 (IR térmico) B7: 2.08-2.35 (IR medio)	30 30 30 30 30 120 30	16	8	185x170
Landsat-7 ETM+	B1: 0.45-0.52 (visible-azul) B2: 0.52-0.60 (visible-verde) B3: 0.63-0.69 (visible rojo) B4: 0.76-0.90 (IR cercano) B5: 1.55-1.75 (SWIR) 1 B6: 10.4-12.5 (IR térmico) B7: 2.08-2.35 (SWIR) 2 B8: 0.515-0.896 (Pancromática)	30 30 30 30 30 60 30 15	16	8	187x170
Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	B1: 0.43-0.45 (Aerosol /costero) B2: 0.45-0.51 (visible-azul) B3: 0.53-0.59 (visible -verde) B4: 0.64-0.67 (visible-rojo) B5: 0.85-0.88 (IR cercano) B6: 1.57-1.65 (SWIR 1) B7: 2.11-2.29 (SWIR 2) B8: 0.50-0.68 (Pancromático) B9: 1.36-1.38 (Cirrus) B10: 10.60-11.19 Infrarrojo térmico (TIRS) 1* B11: 11.50-12.51 Infrarrojo térmico (TIRS) 2*	30 30 30 30 30 30 30 15 30 100 100	16	16	185x180

Tabla 8. Especificaciones técnicas de los sensores TM, ETM+ y Oli del programa Landsat (*DGOT, 2013*).

\*Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30 metros.







## Diferencias y semejanzas de Landsat 8 respecto a Landsat 7

El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM+, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve (Ariza, 2013)

Por otra parte el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+ (Fig.18).

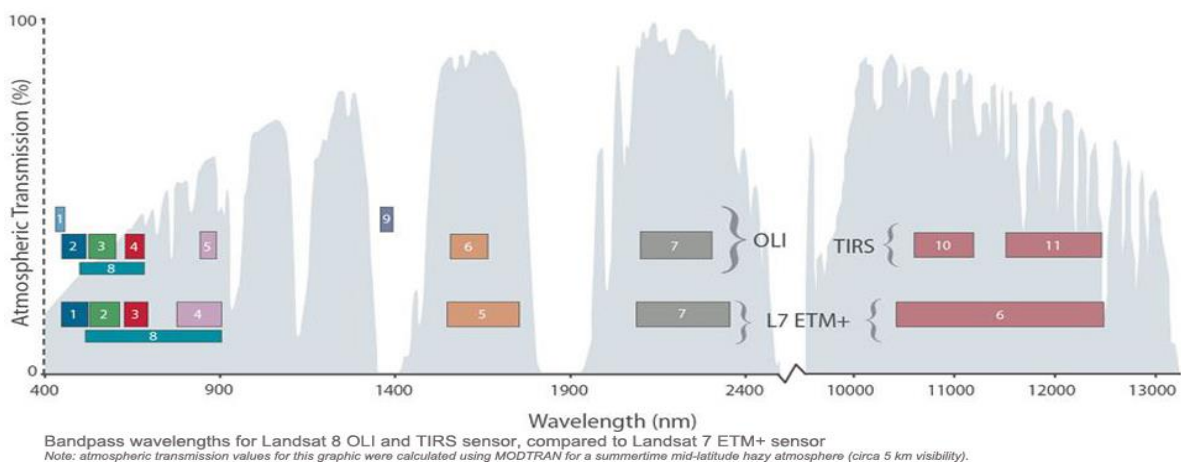


Figura 18. Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7 (USGS, 2013).





## Diferencias en las combinaciones de bandas de L8 con respecto a L5 y L7

Dado que los datos Landsat 8 incluye bandas adicionales, las combinaciones utilizadas para crear composiciones RGB difieren de Landsat 5 y Landsat 7. Por ejemplo, las bandas 4, 3, 2 se utilizan para crear un color infrarrojo (CIR) en la imagen para Landsat 5 o Landsat 7. Para el Landsat 8 se utilizan las bandas 5, 4, 3 para crear el mismo color infrarrojo (CIR). A continuación se muestran algunas combinaciones de bandas comunes de comparaciones RGB para Landsat 5 , Landsat 7 y Landsat 8 (Ariza, 2013).


		Landsat-5/Landsat-7	Landsat-8
	Color Infrarrojo (Vegetación)	4,3,2	5,4,3
	Color Natural	3,2,1	4,3,2
	Falso Color (Análisis de la vegetación)	5,4,3	6,5,4
	Falso Color (Urbano)	7,5,3	7,6,4
	Falso Color (natural con remoción atmosférica)	7,4,2	7,5,3

Tabla 9. Combinaciones de bandas para los sensores TM, ETM+ Y OLI del programa Landsat (USGS, 2013)



## Capítulo ③. Procesamiento y análisis de las imágenes satelitales.

### La imagen digital

#### La formación de la imagen multispectral.

En Percepción Remota se deben comprender los datos proporcionados por los sensores para darles una interpretación adecuada. Es importante conocer las diferencias entre una imagen satelital y una fotografía.

Las imágenes satelitales son captadas por medio de un foto sensor electrónico o mediante la respuesta producida por una emisión de radar. Su formato es digital, lo cual permite que de su proceso de análisis se obtenga información más detallada. Las fotografías tienen un formato analógico, se obtienen mediante películas fotográficas y diversos procesos de revelado químico.

El formato analógico guarda los datos continuamente, por ejemplo, cuando se toma una foto, toda la información se extiende sobre la imagen. El formato digital guarda cada bloque de información diferenciadamente; al acercarnos con el zoom se ven cuadritos de distintas tonalidades. Se puede decir que una imagen digital está compuesta por una matriz de cuadrados, los cuales se denominan píxeles. Un píxel representa una unidad mínima de información de una imagen digital (Kerle, 2004).

Mientras que una cámara normal, fotografía en tres bandas en el espectro visible, o lo que es lo mismo en tres canales: R, G y B, en la imagen multibanda o multispectral, una escena es capturada en múltiples bandas, que van desde el espectro visible a invisible (IR y UV). Este procedimiento de formación de la imagen digital se repite para cada una de las bandas generándose como resultado final una matriz tridimensional en la que el valor del nivel digital de cada píxel está ubicado en una fila





una columna y una banda. De este modo se acuña el concepto de *imagen multispectral* (Kerle, 2004).

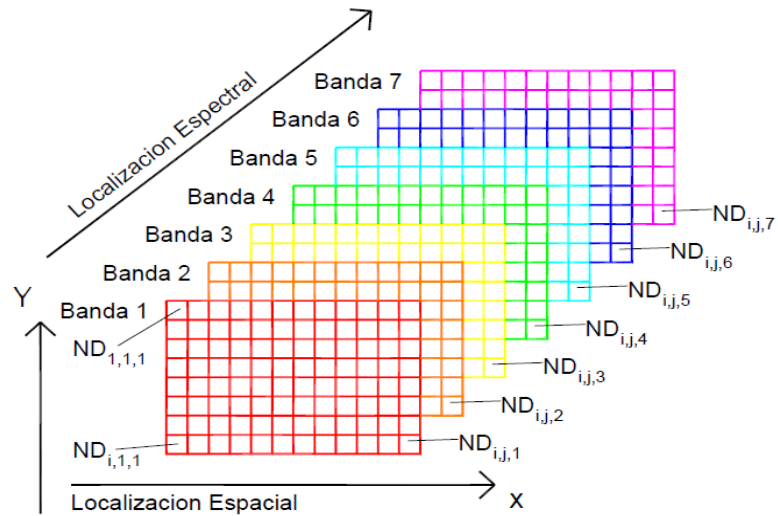


Figura 19. Formación de la imagen multispectral (JTC, 2004).

Cada canal o banda de estas imágenes puede ser mostrado en una imagen en escala de grises o densidades, donde cada pixel se corresponde un nivel de "intensidad".

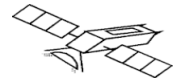
La intensidad de cada pixel corresponde al brillo promedio o intensidad de la radiación medida electrónicamente sobre el área que se está explorando, dicha intensidad se define con un número entero llamado nivel digital (ND).

Normalmente el ND de un pixel va de 0 (negro) a 255 (blanco), así se puede tener una imagen monocroma. Por convención las medidas más intensas están codificadas en blanco y las más débiles en negro (Kerle, 2004).



Figura 20. Distintos tonos de grises.





Esta pila, o conjunto de canales o capas, se denomina “hipercubo”, donde cada pixel esta descrito por las habituales coordenadas X e Y, además de una Z, descrita por la intensidad de dicho pixel en los diferentes canales.

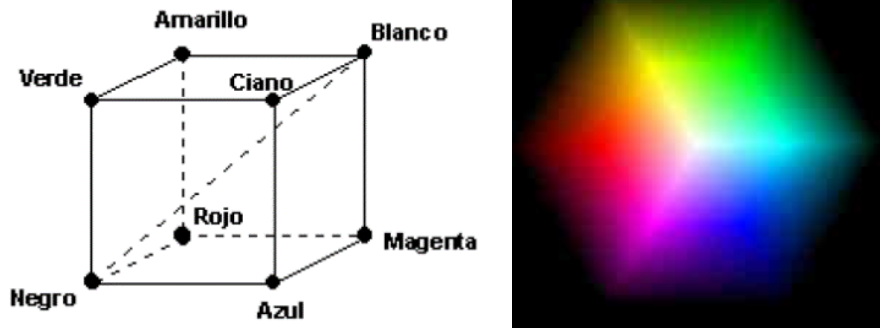


Figura 21. Cubo de color (Pereira, 2013).

El siguiente paso es determinar cuál es la probabilidad que un pixel, o conjunto de pixeles, se corresponda con una determinada característica de nuestra escena (un elemento o compuesto). Para ello tenemos que correlacionar la intensidad de un determinado conjunto de pixeles, con la “firma espectral” del compuesto a detectar.

### Firma espectral

Una firma espectral es una curva, creada a partir de la radiancia (energía reflejada) por cada longitud de onda a lo largo del espectro. De esta forma una superficie, reflejará más o menos energía en determinadas zonas del espectro, fenómeno por el cual percibimos los diferentes colores. Para obtener una *firma espectral* de un compuesto o superficie, necesitamos un espectro radiómetro, o en su defecto espectrofotómetro, el cual nos arrojará el espectro en forma de una curva formada por tantos puntos como bandas sea capaz de resolver dicho dispositivo (Kerle, 2004).





De esta forma un pixel tiene más o menos (0-255) niveles, dependiendo de la energía reflejada por una superficie, para una banda en particular. Así una superficie percibida como “roja” indicará que refleja mucha energía en la región del espectro comprendida entre los 600-700nm, por lo que el pixel resultante tendrá un “nivel de pixel” elevado, mientras que los pixeles de las bandas verdes y azules, tendrán niveles bajos.

Así podemos correlacionar las intensidades de los pixeles con las curvas o firmas espectrales, y en cuantas más bandas seamos capaces de separar nuestra escena, más precisión obtendremos para correlacionarla con una determinada curva.

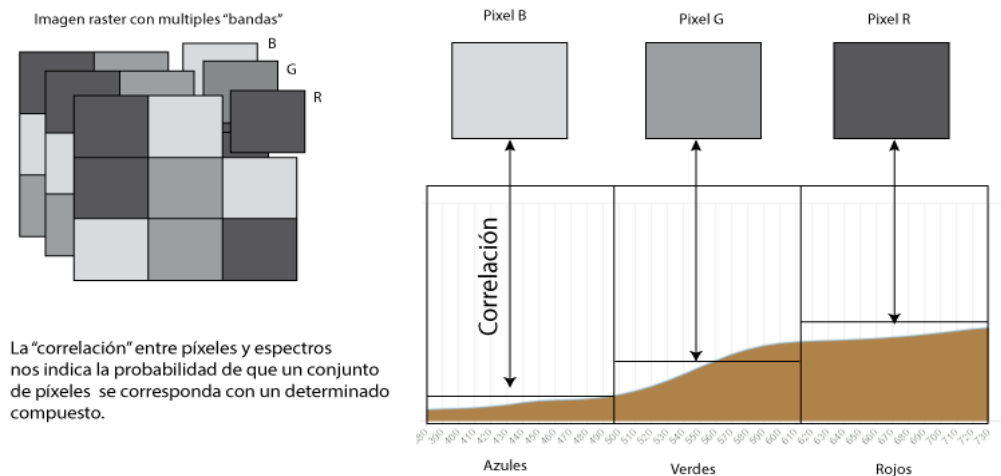
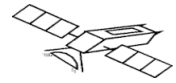


Figura 22. Firma espectral (Pereira, 2013).

## Pre procesamiento y rectificación de la imagen

El análisis digital de las imágenes de satélite toma como materia prima la matriz numérica tridimensional. Las primeras manipulaciones que han de llevarse a cabo tienen como finalidad restaurar la imagen reestableciendo, en la medida de lo posible, las condiciones de toma. Ello implica el desarrollo de dos tipos de correcciones: unas de índole *geométrica* y otras de carácter *radiométrico*.





## Corrección geométrica

Con el nombre de corrección geométrica se engloban las técnicas de corrección de las distorsiones que producen las principales fuentes de error en el momento de la adquisición de la imagen, como son el cabeceo (pitch), alabeo (roll), giro lateral (yaw) y las provocadas por la trayectoria, altura y velocidad de la plataforma que sustenta al sensor. A estas hay que añadir los efectos del relieve y de la esfericidad terrestre (Kerle, 2004).

## Fuentes de distorsión geométrica

Los principales factores o fuentes de error geométrico en la imagen son:

- Rotación de la Tierra
- Ancho campo de visión de algunos sensores
- Curvatura de la Tierra
- Variaciones de altitud, actitud y velocidad de la plataforma
- Efecto panorámico
- Relieve del terreno

Estas fuentes de error van a producir unas distorsiones desde el punto de vista geométrico que pueden ser tratadas en la mayoría de los casos conjuntamente, es decir, aplicando una corrección se pueden minimizar los errores procedentes de distintas fuentes.

## Corrección geométrica y georreferenciación

Estos procedimientos implican una alteración de la situación y forma original del pixel en la imagen y una asignación de posición en un sistema de referencia geográfico.





### Método no paramétrico/ Método Polinómico

En el método no paramétrico, los parámetros de transformación de los diferentes modelos se deducen a partir de los puntos de control, es decir, a partir de puntos con coordenadas conocidas en el sistema de referencia terreno (X,Y) y en el sistema imagen (x,y). El método no paramétrico más usado es el que se conoce como método polinómico. Este método asume que no se conocen las fuentes de los errores, pero que estos pueden modelizarse a partir de ajustar unas ecuaciones a un conjunto de puntos, de los que se conoce tanto las coordenadas imagen a corregir como las de un mapa de referencia. (Kerle, 2004). Lo expresamos de la siguiente forma:

$$x = a_0 + a_1 r_n + a_2 c_n$$

$$y = b_0 + b_1 r_n + b_2 c_n$$

Donde:

$r_n$  = Número de renglón

$c_n$  = Número de columna

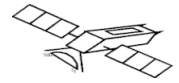
x e y Coordenadas del mapa

Para hacer la transformación se deben calcular los coeficientes de los polinomios ( $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ ) y seleccionar puntos que puedan localizarse en el mapa (x,y) y en la imagen (renglón, columna). Estos puntos deben ser perfectamente identificables en la imagen y mapa, además de que no estén sujetos a cambios temporales. Entre más puntos se seleccionen menor será el error en cuanto a su localización real.

Este modelo es válido para territorios en los que existe poco rango de variación altimétrica. Si este no es el caso, se debe aumentar el rango de los polinomios o introducir en los mismos términos que dependan de las elevaciones. (Palá & Pons, 1995).







La exactitud de la transformación se obtiene con el promedio de los errores en los puntos de referencia, este error es llamado error medio cuadrático (RMS) y se valora comparando las coordenadas calculadas con la transformación y las reales. Si el valor no es satisfactorio se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y el proceso termina cuando todos los puntos presentan un valor de RMS dentro de los límites establecidos como aceptables.

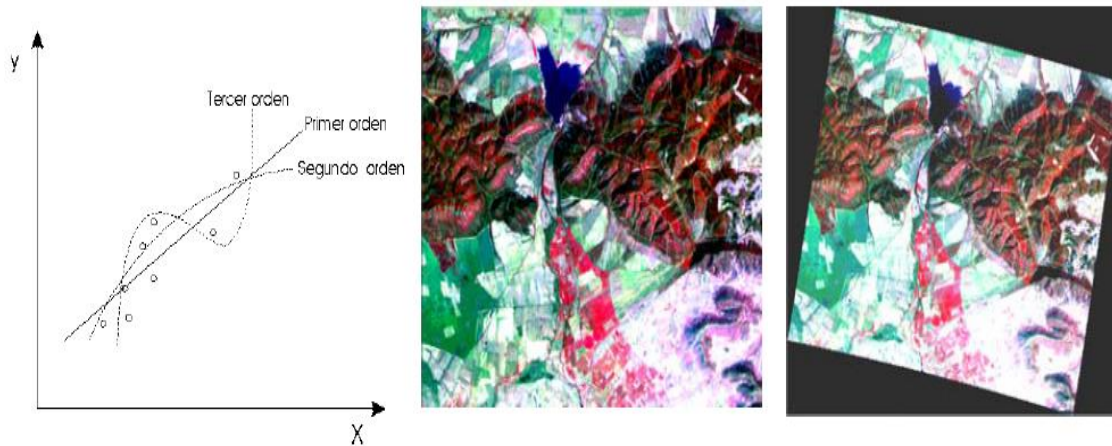


Figura 23. Ordenes de los polinomios (izq.), Imagen satelital TM original (centro) e imagen corregida (der.) (Rejas Ayuga, 2008).

### Remuestreo de la imagen

Una vez que tenemos la imagen corregida, hay que transferir el nivel digital empleando para ello el de la imagen original (Chuvieco, 2008). Se puede hacer de tres formas:

- a) *Método del vecino más próximo*: Sitúa a cada pixel de la imagen corregida el valor del pixel más cercano en la imagen original. Es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los valores originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que se produce en rasgos lineales de la imagen (como carreteras), ya que una vez corregidas aparecerían como líneas quebradas.





- b) *Interpolación bilineal*. Se promedian los valores de los cuatro pixeles más cercanos de la imagen original. Este promedio se pondera según la distancia del pixel original al corregido. Este método reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales pero difumina los contrastes espaciales de la imagen original.
- c) *Convolución cúbica*. Se considera un promedio ponderado de los 16 pixeles más próximos. La imagen corregida es la más correcta, pero se requiere de un volumen de cálculo mucho mayor.

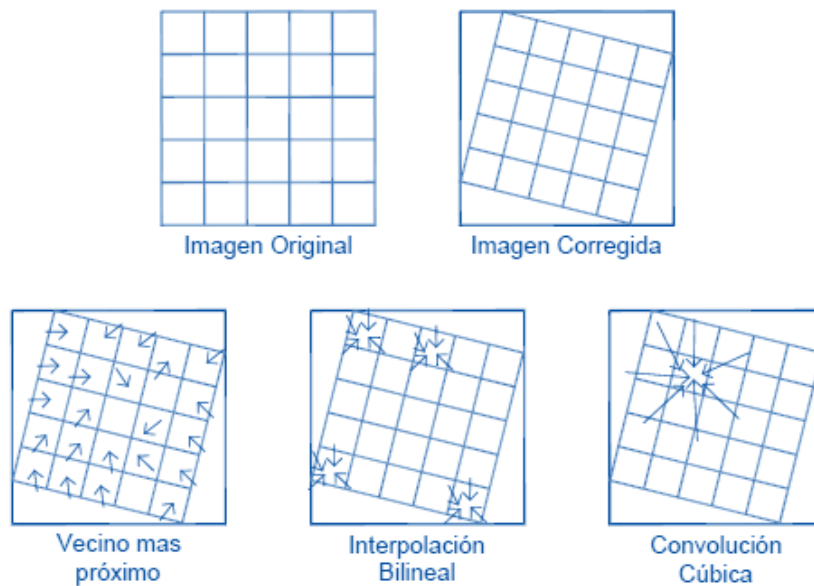


Figura 24. Métodos de interpolación (Chuvieco Salinero, 2008).

## Corrección radiométrica

### El fotodiodo

El fotodiodo es un dispositivo que conduce una cantidad de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que lo incide (lo ilumina).





El flujo de corriente, denominado fotocorriente, en el circuito externo, es proporcional a la irradiancia efectiva en el dispositivo. En un fotodiodo además de la generación térmica se le suma la "Generación por energía luminosa", a mayor iluminación mayor intensidad de corriente. Por ello, este tipo de dispositivos, convierten energía luminosa (radiación electromagnética) en energía eléctrica.

El fotodiodo exhibe un pico de respuesta en una longitud de onda radiante determinada. Tal longitud de onda viene en la llamada curva de sensibilidad espectral del fotodiodo. Tales curvas muestran una relación entre la longitud de onda de la radiación incidente y la intensidad generada por cada vatio de energía recibida (Kerle, 2004).

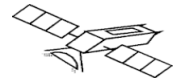
Los dispositivos de carga acoplada (CCD) no son más que dispositivos electrónicos de silicio que en cada uno de sus puntos fotosensibles incorpora un fotodiodo, cuya propiedad es generar electrones dependiendo de la cantidad de luz que incide sobre él.

## Radiancia

Así pues para cada fotodiodo (correspondiente a una cierta superficie en el terreno), existe una cantidad de radiación electromagnética de entrada (expresada en términos de irradiancia) y una tensión de salida, esta tensión, se amplifica mediante los correspondientes dispositivos electrónicos (transistores funcionando como amplificadores) y posteriormente se digitaliza, mediante conversores analógico digitales (ADC), el resultado se almacena en un cierto número de bits. A manera de ejemplo, 8 en el sensor ETM+ (Ariza, 2013).

De tal modo que a cada irradiancia ( $L$ ) le corresponde un valor digital (ND). Existe una relación lineal entre ambas, mediante un factor multiplicativo, denominado ganancia y una constante aditiva denominada sesgo.





$$L = ND * Ganancia + Sesgo$$

Un escáner formador de imágenes, a bordo de satélite, puede (teóricamente) configurarse como un solo CCD que vaya barriendo el terreno en X (avance del satélite) e Y (movimiento transversal del sensor). Este tipo de configuración se denomina barrido trasversal y es la que se corresponde con el sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM+), aunque, en este caso (para cada banda) se barren 16 líneas al mismo tiempo (16 CCDs) para las bandas 1,2,3,4,5 y 7 ( de 30 m. de resolución espacial), 8 líneas ( 8 CCDs ) para la banda 6 (60 m. de resolución) y 32 líneas (32 CCDs) para la banda 8 (15 m. de resolución) (Ariza, 2013).

Cuando el usuario adquiere una imagen de satélite, dentro de los metadatos correspondientes a la misma encuentran los coeficientes de calibración (sesgo y ganancia) de cada una de las bandas de la imagen.

El Sensor ETM+ trabaja con los detectores en dos modos de ganancia, alto o bajo (*HIGH, LOW*), la finalidad es evitar llegar a la saturación cuando las condiciones de iluminación son elevadas. De esta forma se aumenta el rango dinámico en que pueden trabajar los foto detectores. Cuando las condiciones de iluminación son elevadas, entonces trabajan con ganancia baja, cuando son escasas, trabajan con ganancia alta.

## Reflectividad

Para escenas Landsat relativamente claras, puede obtenerse una reducción de la variabilidad entre escenas realizando una normalización por irradiancia solar, convirtiendo radiancia espectral a reflectividad planetaria. Tal variable combina la reflectividad de la superficie terrestre, con los efectos atmosféricos y puede obtenerse mediante la siguiente fórmula:





$$\rho_{\lambda} = \left( \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s} \right)$$

Donde:

$\rho_{\lambda}$  = Reflectancia

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral medida por el sensor

$d$  = Distancia del sol a la tierra en unidades astronómicas, interpolada a partir del día juliano de la toma de la fecha de la escena

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

$\theta_s$  = Ángulo cenit solar

### Realces y mejoras visuales de la imagen.

Después de que la imagen se ha sometido a los procesos de corrección geométrica y radiométrica, se procede a mejorar la interpretación visual de la imagen para que los datos de interés presentes en ella sean más evidentes.

El primer contacto visual con la imagen del satélite en crudo pone de manifiesto una serie de deficiencias sobre su aspecto. Estas pueden subsanarse de cara a conseguir una interpretación de la misma. Dichas mejoras se concretan en las operaciones de ajuste del contraste y en la generación de aplicaciones en color (Kerle, 2004)

Por ajuste del contraste se entienden todas aquellas técnicas de expansión o compresión del histograma de la imagen original que tienen como finalidad acomodarlo al rango dinámico del dispositivo de salida: monitor del ordenador.





La mejora del contraste consigue, mediante el retoque radiométrico, aumentar la calidad visual de las imágenes haciendo más eficaz su interpretación. A tales efectos los programas de tratamiento de imágenes digitales en general, disponen de múltiples técnicas que se ejecutan de modo sencillo.

### Visualización de imágenes multibanda.

La imagen digital capturada desde el satélite en principio no es más que un conjunto ordenado de números. El resultado de cargar una sola banda y visualizarla a través del monitor será el de una imagen en blanco y negro, poco atractiva.

### Composición de color

Las composiciones en color, suponen operar con imágenes multibanda. La técnica consiste en asignar a cada cañón del monitor de video una de las bandas de la imagen multispectral. Se procede a almacenar los valores para el rojo, verde y azul, cada valor representa una intensidad relativa (con valores de 0 a 255). Las tres intensidades juntas definen el color final y los valores de píxeles de las 3 imágenes de entrada son usados para definir los valores correspondientes a los píxeles en la composición (Kerle, 2004). Una combinación de píxeles con valores de ND altos producen colores claros, mientras que las combinaciones de píxeles con ND bajos producen colores oscuros. Dependiendo de la combinación específica de rojo, verde y azul se generara un color diferente.

En el caso de existir una correspondencia entre las longitudes de onda de las bandas y el color del cañón de video asignado, hablaremos de una composición en color verdadero. Los colores de los objetos se verán del mismo modo que los percibimos a través de nuestro sentido de la vista. En caso contrario, cuando la composición no respete las relaciones entre longitudes de onda de las bandas y cañones de video, hablaremos de una composición en falso color.



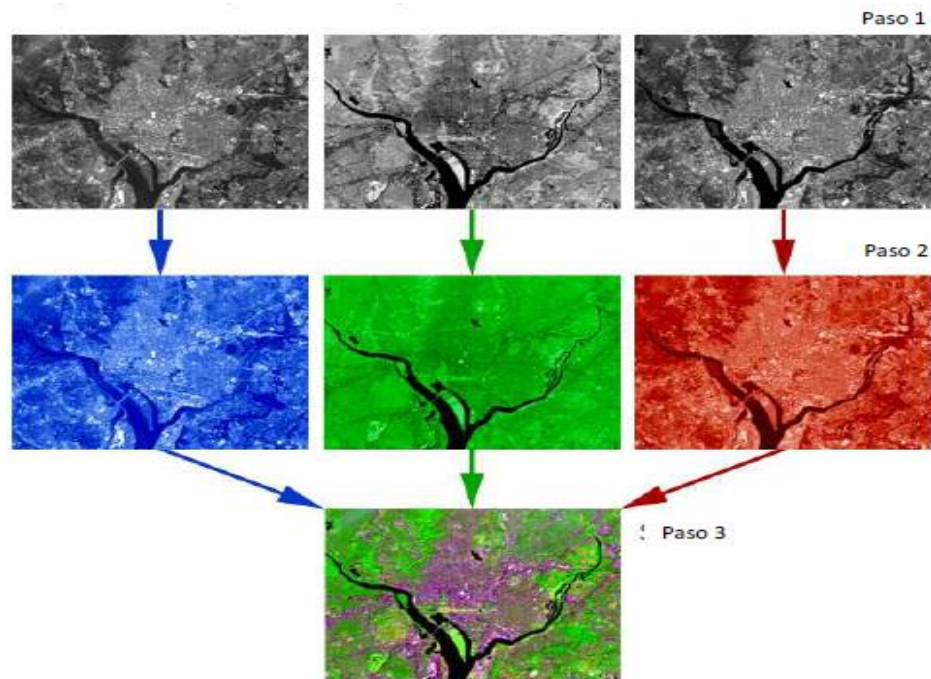
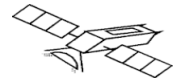


Figura 25. Combinación de bandas en una imagen satelital (NASA, 2011).

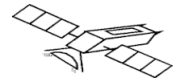
## Análisis de las imágenes

El análisis de las imágenes procedentes del satélite puede llevarse a cabo de dos modos: mediante *interpretación visual* o bien mediante *técnicas de tratamiento digital de información multispectral*.

La *interpretación visual* pretende, sin intervención del ordenador, extraer información espacial a partir del análisis de la imagen y sus cualidades (brillo, color, textura, forma, tamaño de los elementos que la componen) (Kerle, 2004).

El *tratamiento digital* se encamina, del mismo modo, hacia la extracción de información temática del territorio, pero haciendo uso de técnicas matemáticas y estadísticas implementadas mediante algoritmos en programas informáticos.





## Clasificación digital

La clasificación de una imagen conlleva operaciones que identifican digitalmente y clasifican los píxeles de la imagen definiendo su ND. Generalmente se lleva a cabo utilizando múltiples bandas, y en este proceso se asigna a cada píxel una clase particular basada en su radiancia. Según (Vicens, 2009) las técnicas de clasificación de imágenes posibilitan la transformación de imágenes crudas (fotografías aéreas, imágenes de satélite, etc.) en datos temáticos o mapas que mostraran información con un significado evidente. Los procesos de clasificación se pueden dividir en dos grandes subdivisiones: clasificación *supervisada* y *clasificación no supervisada*.

## Clasificación supervisada

En la clasificación supervisada el analista identifica en la imagen las muestras representativas de los diferentes tipos de cobertura (categorías de interés) en la superficie. Estas muestras se conocen como campos de entrenamiento.

La fase de *entrenamiento* tiene por objeto la determinación de unas áreas piloto para cada una de las categorías en que las que se pretende clasificar la imagen. De ellas el ordenador extraerá los valores estadísticos característicos (media aritmética, desviación típica, rango...) en cada una de las bandas para posteriormente tomarlos en consideración a la hora de asignar el resto de los píxeles a las categorías preestablecidas (Kerle, 2004).

La fase de *asignación* persigue la categorización de todos los píxeles de la imagen atribuyéndoles una categoría informacional. Para ello existen múltiples criterios que se desarrollan apoyándose en teorías probabilísticas, y que reciben el nombre de clasificadores: de mínima distancia, de paralelepípedos, de máxima probabilidad (Kerle, 2004).





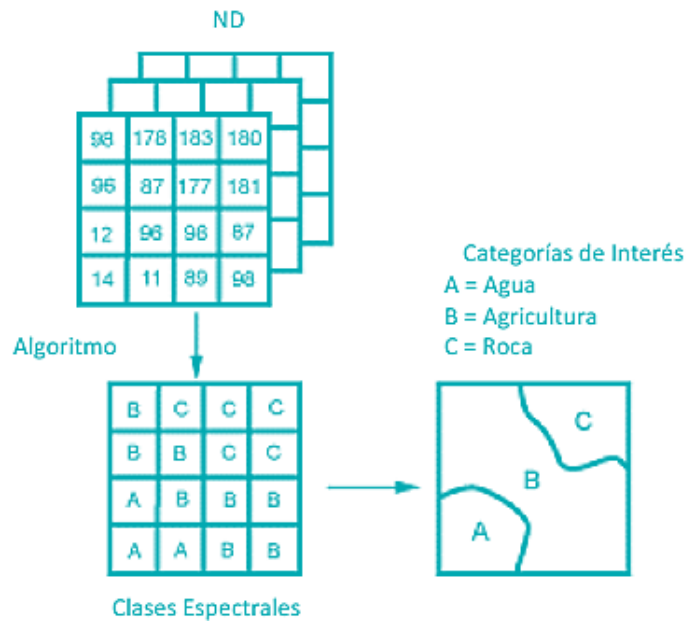
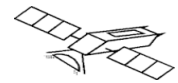


Figura 26. Clasificación Supervisada (ITC, 2004).

Finalizan las tareas de clasificación supervisada mediante la ejecución de los trabajos de *verificación*. Se pretende en esta fase final analizar la bondad de los resultados obtenidos en la clasificación temática contrastándolos con la verdad-terreno.

La definición del tamaño y forma de la muestra son cruciales y han de llevarse a cabo de modo riguroso. El resultado del contraste entre el mapa temático obtenido y la verdad-terreno se recoge en una tabla de contingencias que se denomina, matriz de error. De su análisis estadístico se infiere la fiabilidad de los resultados obtenidos.

### Clasificación no supervisada

En este método se definen las clases espectrales presentes en la imagen. Estas clases forman agrupaciones de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo, después el usuario interpreta el significado de esas categorías (Kerle, 2004).



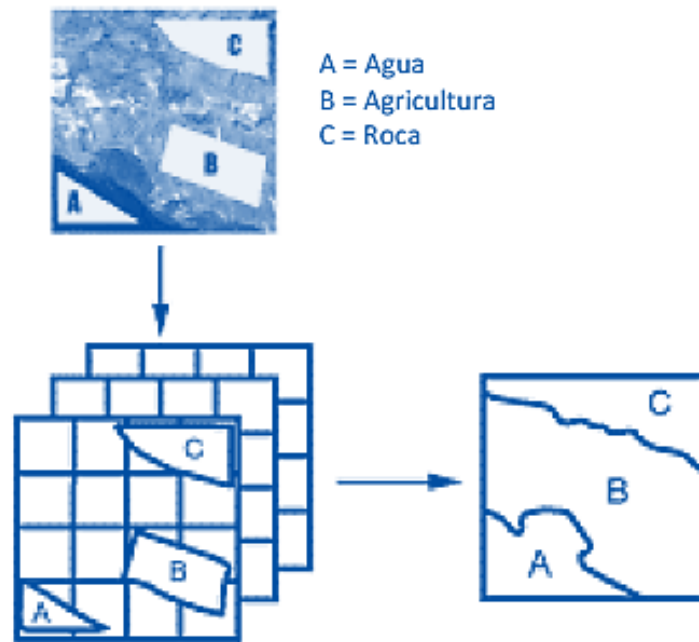


Figura 27. Clasificación No supervisada (ITC, 2004).

### Índices de vegetación

Prácticamente desde el lanzamiento de los primeros satélites de observación de la Tierra, se ha realizado un gran esfuerzo para estudiar el estado y dinámica de la vegetación por medio de índices de vegetación. Se ha desarrollado diferentes índices, basados en la combinación de dos o más bandas espectrales, partiendo del hecho de que el análisis multibanda podría proporcionar más información que el monobanda.

La mayoría de los índices utilizan la radiancia, la reflectividad a nivel del suelo, o la reflectividad aparente al exterior de la atmósfera (Kerle, 2004). Se ha demostrado que los valores de las bandas del Rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC) son los que más relacionados están con diferentes parámetros relativos a la vegetación, tales como biomasa verde, concentración de clorofila. Índice de área foliar, defoliación, actividad fotosintética y otros (Chuvieco, 2008).





## Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Introducido por (Rouse, et al., 1974) para producir un índice espectral, que separa la vegetación verde del suelo utilizando datos digitales. Este se expresa como la diferencia entre las bandas infrarroja cercana y roja normalizada por la suma de esas bandas, es decir:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Este índice, se basa en la diferencia entre la máxima absorción de radiación en el rojo a causa de los pigmentos clorofílicos y la máxima reflexión de radiación en el infrarrojo cercano debido a la estructura celular de la hoja y al hecho de que el suelo desnudo, carente de estos mecanismos, no muestra una diferencia espectral tan drástica, el intervalo de medida posee la apreciada propiedad de oscilar de -1 a 1 con el 0 representando el valor aproximado de la falta de vegetación. Entonces, los valores negativos representan las superficies sin vegetación.



### Ubicación geográfica

El complejo de humedales de Teacapán - Agua Brava - Marismas Nacionales (La Reserva de la biosfera Marismas Nacionales, RBMN) se ubica entre las coordenadas geográficas 21° 32' a 22° 45' Latitud Norte y 105° 15' a 105° 50' Longitud Oeste (Carrera, 2003), en la costa noroccidental del Pacífico Mexicano entre la costa sur de Sinaloa y la costa norte de Nayarit; el sistema incluye llanuras aluviales, esteros lagunas costeras, estuarios y marismas, y los municipios que abarca este complejo de humedales son: Escuinapa (Sinaloa), Acaponeta, Rosamorada, Tecuala, Tuxpan y Santiago Ixcuintla (Nayarit) (Figura 28).

Teacapán se localiza en el extremo norte del sistema y consiste en un canal de mareas relativamente profundo que se comunica permanentemente con el Océano Pacífico. La laguna de Agua Brava es el principal cuerpo lagunar del sistema y se comunica con el mar a través de la boca artificial de Cuautla, que fue abierta a principios de los años setenta y se encuentra rodeada de diversas lagunas y esteros. Marismas Nacionales están constituidas por una serie de barreras y lagunas semiparalelas (sedimentos que llegan al mar aportados por los ríos, los cuales transportan las arenas y demás sedimentos en suspensión hasta formar un depósito alargado en forma de camellón) de pocos metros de anchura en el extremo sur del sistema (Carrera, 2003)

La RBMN es uno de los ecosistemas de manglar más importantes del Pacífico de América, debido a que esta región presenta una amplia diversidad de flora y fauna tanto terrestre como acuática, donde habitan una gran variedad de peces, crustáceos y moluscos de importancia económica para México, así como barrera natural contra huracanes, regulador del clima, control de la erosión del terreno, suministro de agua y captura de dióxido de carbono.





### Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales Sinaloa-Nayarit, México

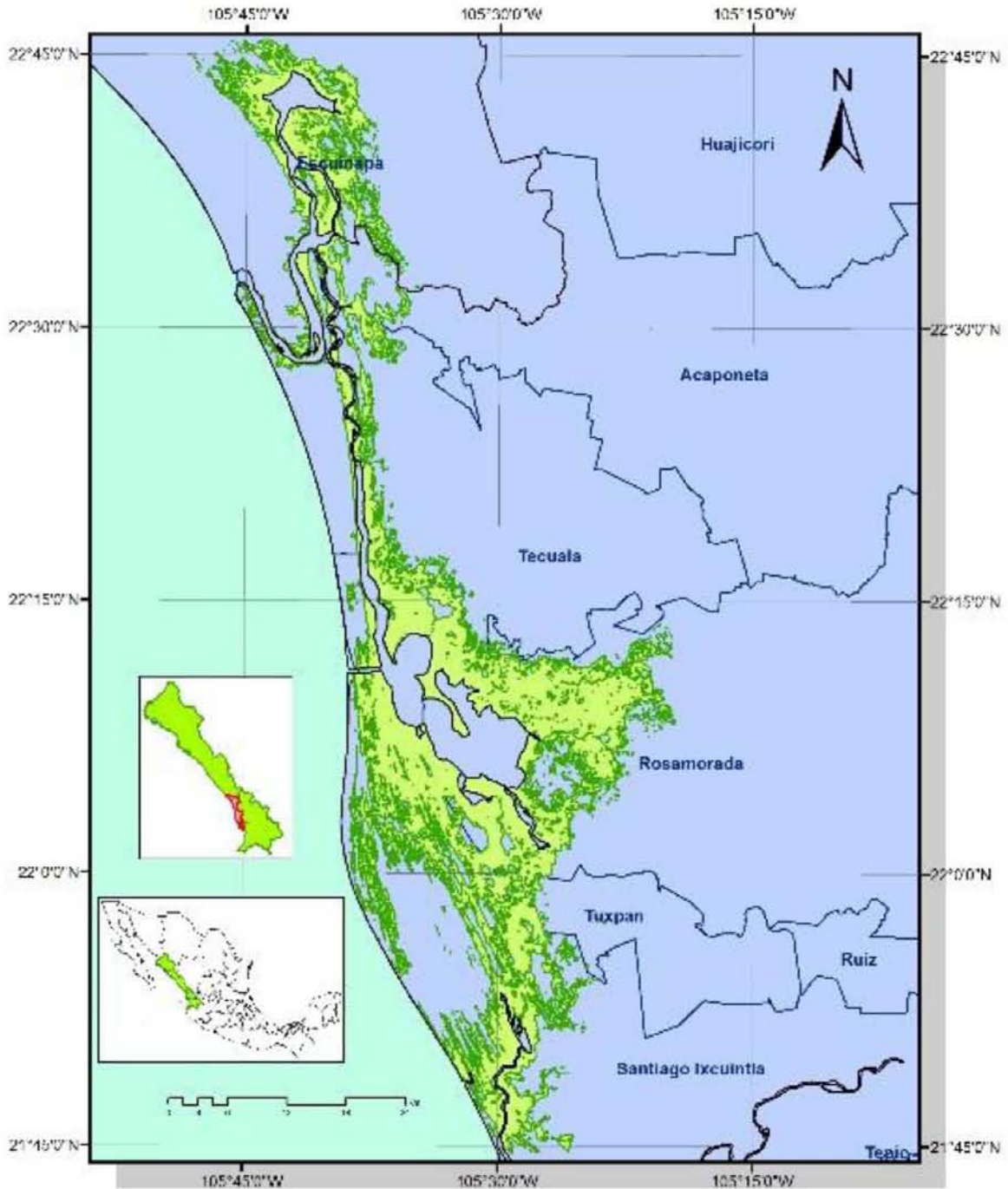


Figura 28. Localización de la BRMN (elaboración propia).





La RBMN debe considerarse como una zona de reproducción y como parte del eslabón del corredor de aves migratorias del Pacífico, debido a su importancia como zona de descanso y alimentación de aves acuáticas, tanto residentes como migratorias. Por los atributos anteriores, la zona de la RBMN fue designada como sitio Ramsar número 732 en junio de 1995, y el criterio que lo justifica es que se trata de un humedal representativo que desempeña un papel hidrológico, biológico y económico significativo en el funcionamiento natural de una cuenca hidrográfica o sistema costero de cañadas que abarca dos estados (Nayarit y Sinaloa) (SEMARNAT-CONANP, 2005). Otras categorías de priorización de la RBMN se presentan en la siguiente tabla 10.



Figura 29. Zona de descanso y alimentación de aves acuáticas (La Jornada Ecológica, 2012).

Nominación	Institución
Reserva de la Biosfera; 12 de mayo de 2010	CONANP
Área de Importancia para la Conservación de las Aves (sitio AICA): Clave C-56, 1998.	CIPAMEX, Bird Life Internacional, CONABIO
Región terrestre Prioritaria: RTP-61 Marismas Nacionales	CONABIO
Región Marina Prioritaria: 21 Marismas Nacionales	CONABIO
Región Hidrológica Prioritaria: 22 Río Baluarte-Marismas Nacionales	CONABIO
Región Hidrológica Prioritaria: 23 San Blas – La Tovar	CONABIO
Región Prioritaria para la Conservación (PRODERS)	CONANP
Sitio Prioritario para la Conservación de los Ambientes Costeros y Oceánicos de México (Corredor Pesquero Laguna el Caimanero-Marismas Nacionales)	CONABIO, CONANP, PRONATURA, TNC.

Tabla 10. Categorías de priorización de la RBMN (SEMARNAT, 2012).





## Descripción del área de estudio

### Características físicas

#### Clima

Es Aw1 (57.72 %) cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 55% al 10.2% del total anual; y Awo (48.28%) cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual (CONABIO, 2009).

#### Historia de huracanes y tormentas tropicales

- Huracán Rosa, 14 de octubre de 1994, aprox. 160 km/hr de vientos.

#### Edafología

La región de la RBMN presenta suelos minerales poco evolucionados de aporte coluvial-marino no consolidado con erosionalidad moderada y salinización y/o sodificación. También presenta suelos con acumulación de sales solubles con alto contenido de sodio y suelos corrosivos cuyo contenido de sales afecta en grado variable a los materiales utilizados en la construcción que quedan en contacto directo con dichos suelos (Villar, 2001).





## Hidrografía

Los principales ríos que atraviesan la región de Norte a Sur son: el Acaponeta, el San Francisco, el Rosamorada, el Bejuco, El San Pedro, el Río Grande de Santiago y el de San Blas. Las lagunas costeras de la RBMN presentan condiciones esturianas de alta permanencia; la mezcla de aguas marinas y continentales generan las condiciones que las caracterizan como los cuerpos lagunares más productivos del noroeste. Sostienen importantes pesquerías lagunares y de alta mar. Los cuerpos lagunares de pequeñas dimensiones son ecosistemas de alta productividad (Villar, 2001).

## Descripción biológica de la RBMN

### Vegetación y especies características

Esta región cuenta con manglares y estuarios (15% - 20% de la totalidad de los manglares del país y los más extensos en su tipo en la costa del Pacífico), (Conabio, 2009) pequeños bosques de selva tropical maderables (cedros, encinos, amapas entre otros), no maderables (palma de aceite, palma de coco de agua, mangle rojo (*Rhizophora mangle*), blanco (*Laguncularia racemosa*), negro (*Avicennia germians*), y Botoncillo (*Conocarpus erectus*). Existen 14 especies de flora nativa que se encuentran bajo situación de riesgo (endémicas, amenazadas y/o en peligro de extinción).



Figura 30. Manglares de RBMN (CONABIO, 2009).







## Descripción de las especies de mangle en la RBMN

*Rhizophora mangle*: poseen raíces zancudas que le sirven de apoyo y sostén en el sustrato fangoso y en condiciones de fuertes mareas y vientos. Las hojas son grandes y redondeadas. Las flores son enceradas de color amarillo cremoso con cuatro pétalos puntiagudos de apariencia estrellada. Los frutos llamados propágulos tienen entre 20 - 30 cm de largo, se desprenden del árbol y caen al lodo o al agua; estas estructuras desarrollan pequeñas raíces por lo que se fijan al sustrato en lugar donde caen o son arrastradas por las mareas hacia otros sitios (Alonzo, et al., 2006).

*Laguncularia racemosa*: el mangle crece bajo una gran variedad de condiciones, por lo general se le puede encontrar en la franja interior de los manglares, en los suelos elevados o en donde las inundaciones por las mareas son menos frecuentes e intensas. Las raíces poseen neumatóforos y sus hojas son achatadas, redondeadas con estructuras en la base para excretar la sal. Las flores son alargadas en forma de embudo y pequeñas de color blanco. Los frutos se dan en racimos (Alonzo, et al., 2006).

*Avicennia germinans*: crecen en lugares donde la tierra es más pobre en oxígeno y en condiciones más saladas. Alrededor de la base del árbol y con frecuencia más allá de la copa del árbol, se extienden unas prolongaciones de las raíces que salen hacia arriba de ellas en forma de "dedos finos" llamados neumatóforos. Estas estructuras generalmente son largas para poder sobresalir del agua en tiempo de mareas altas, ya que su principal función es la respiración. Las flores son de color blanco, con cuatro pétalos redondeados. Los frutos son cuerpos redondos aplanados (Alonzo, et al., 2006). De la corteza se extraen taninos y es una especie que produce néctar (CONAFOR, 2009).





## Usos de las especies de manglar

- *Rhizophora mangle*: Los usos que se le da a esta especie son: medicinales; los taninos para teñir redes y camarón; el tronco como viga de soporte de techos en las casas (Kovacs J. , 1999).
- *Laguncularia racemosa*: frecuentemente usada en la construcción de galerías de tabaco, estacas, postes, tapos (trampas para peces), cercas y muros. También se utiliza para asar y ahumar pescado (CONABIO, 2009)
- *Avicenia germinans*: para la construcción de casas. Potencialmente como pastura.

En general los usos del manglar son para el cultivo de moluscos (Figura 31).



Figura 31. Uso del manglar para cultivos de moluscos (*La Jornada Ecológica*, 2012)

## Faunas y especies características

El sitio alberga una población de 446 especies de aves, 38 son aves playeras. Las especies de fauna en la región (mamíferos, aves, reptiles y anfibios) suman un total de 99 endemismos con 73 especies





amenazadas o en peligro de extinción. Algunos ejemplos de estas especies en la RBMN se presentan en la siguiente Tabla 11.

Especies	Nombre común/Nombre científico
Anfibios	Rana de árbol, <i>Hyla smaragdina</i> Sapo boca angosta, <i>Gastrophryne olivacea</i>
Reptiles	Boa constrictor, <i>Boa constrictor</i> Tortuga golfina, <i>Lepidochelys olivacea</i> Cocodrilo de río, <i>Crocodylus acutus</i> Iguana Negra, <i>Ctenosaura pectinata</i>
Aves	Colibrí corona violeta <i>Amazilia violiceps</i> (especie endémica) Cotorra guayabera, <i>Amazona albifrons</i> (especie endémica) Águila real, <i>Aquila chysaetos</i> Pato golondrino, <i>Anas acuta</i> Aguililla canela, <i>Busarellus nigricollis</i> Halcón Peregrino, <i>Falco peregrinus</i>
Mamíferos	Jaguar, <i>Panthera onca</i> (en peligro de extinción) Ocelote, <i>Leopardus pardalis</i> (en peligro de extinción) Venado cola blanca, <i>Odocoileus virginianus</i> Lince, <i>Lynx rufus</i> Mapache, <i>Procyon lotor</i> Coyote, <i>Canis latrans</i> Conejo, <i>Sylvilagus audubonil</i> Liebre antílope, <i>Lepus allani tiburonensis</i>

Tabla 11. Ejemplos de la fauna de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales (UNAM, 2011).





## Problemática

**Modificación del entorno:** perturbación a distancia por alteración de cuencas (menor aporte de agua dulce), caminos (discontinuidad del patrón hidrológico); apertura de bocas (mortalidad del manglar). Decremento de superficies acuáticas e incremento de marismas como consecuencias de modificaciones en patrones hidrológicos (Conabio, 2009). Desarrollo incontrolado de actividades agropecuarias (Desección de humedales para potreros, deforestación con fines agrícolas e introducción de ganado caprino) y pesqueras así como actividades acuícolas desordenadas (construcción de bordos y granjas camarónicas).

**Contaminación:** descarga de contaminantes (agroquímicos, pesticidas y metales pesados), desechos de aguas negras.

**Uso de recursos:** presión del sector pesquero sobre tiburones, cocodrilos en riesgo. Uso de venenos y trampas no selectivas. Introducción de especies exóticas a islas. Falta de alternativas productivas.

**Desarrollos:** desarrollo urbano, agrícola, acuícola y minero inadecuadamente planeados.

- Construcción de infraestructura carretera, por ejemplo la construcción de la carretera Novillero al campo pesquero de Pericos en Nayarit, interrumpió el paso de la marea a la zona de manglar provocando pérdida en la estructura de este y su transformación a marismas con matorrales dispersos de manglar (Conabio, 2009).
- Apertura del canal de Cuautla (3.5 km de largo aprox. 1 km de ancho) al sur de Palar de Cuautla. La apertura de este canal se dio en 1971 para conectar la laguna de Agua Brava con el océano Pacífico y así incrementar la productividad pesquera del sistema. El canal se ha erosionado aumentando su ancho y profundidad. Con la apertura de este canal y su continua erosión, se han modificado los patrones de circulación fisicoquímicas del agua. A partir de entonces se comenzaron a registrar mortalidades considerables de árboles de manglar. (Figura 32).





- Incremento de turismo, potencialmente en destinos de playa particularmente al norte del sistema en Nayarit y sur de Sinaloa.

**Naturales.** Pérdida de árboles de manglar principalmente de las especies de *L. racemosa* y *A. germinans* por el efecto del huracán Rosa en octubre de 1994 (Conabio, 2009).



Figura 32. Evolución del canal de Cuautla a través de imágenes de satélite Landsat (Berlanga, 2012).

## Usos y aprovechamientos, actuales y potenciales de los recursos naturales en la RBMN

### Agricultura

La estructura económica de la zona de estudio descansa fundamentalmente en las actividades primarias, en concreto la agricultura, la cual se basa en un reducido número de cultivos anuales como es el frijol, maíz, arroz, tabaco en términos de estructura productiva en la región existe una tendencia





a conservar los anteriores cultivos, pero en ocasiones se diversifica con chile, sandía, jitomate, mago, etc.

Sin embargo esta dominancia de las zonas de agricultura no implica que esta actividad se la más importante en la región, ya que no necesariamente la totalidad del área se usa para la agricultura; si no se diversifica con la pesca, ganadería y turismo.

En la mayor parte de la RBMN la agricultura y la pesca se practica en mediana escala y de manera extensiva lo cual implica poca inversión en mano de obra e insumos y en consecuencia los rendimientos son bajos. Por lo anterior las zonas de agricultura no se traducen en un gran valor económico de la actividad agropecuaria, esto y la superficie destinada a maíz indican que la región es un área de producción de subsistencia (Kovacs J. , 1999)

### Ganadería

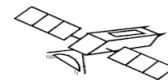
La actividad pecuaria en el municipio se basa en las especies de bovinos, ovinos, porcinos, donde se cuenta con áreas para su cría, que proporcionan la producción de proteínas para la población. En la misma zona se encuentran granjas avícolas.

Es importante especificar que la actividad pecuaria en la zona de estudio actualmente no es en gran escala y algunas cabezas de ganado que se localizan en la región son migratorias. Por lo que el índice de presión por actividad pecuaria es bajo por la limitada especialización pecuaria (Kovacs J. , 2008)

### Forestal

En la RBMN, el aprovechamiento forestal está destinado a humedales principalmente el mangle y solamente en el municipio de Santiago se reporta aprovechamiento de madera.





En las estadísticas de INEGI para 2001, no reporta ningún porcentaje de aprovechamiento forestal del mangle en esa región, por lo que su explotación puede ser no reportada (CONABIO, 2009). Los pobladores de la región explotan los manglares para usarlo como madera para la construcción, leña y postes para las áreas de cultivo, pesca. etc.

Actualmente no existe un aprovechamiento forestal del mangle, sin embargo en algunas zonas existen procesos de deforestación por saqueo clandestino de madera.

## Pesca

La pesca es una de las principales actividades de la RBMN por su extraordinario potencial que se ha formado debido a que condiciones del medio físico favorecen de manera muy importante la producción primaria (Berlanga Robles, 2006). La RBMN cuenta con aguas estuarinas y continentales; adicionalmente, cuenta con corrientes constantes de ríos y arroyos que ofrecen una amplia disponibilidad de aguas dulces. Con respecto a la producción de camarón, en la actualidad la pesca ha disminuido por efecto de que muchas de las cooperativas se transformaron en granjas acuícolas, razón por la cual la baja en la producción debe ser considerada como un evento técnico, más que un efecto sobre la pesquería (Berlanga, 2007). Sin embargo, las limitaciones que en general se tienen en toda la industria pesquera, se resienten con más fuerza en la pesca de camarón, debido a que este se obtiene en aguas interiores y al no existir infraestructura de proceso y congelación, este se busca colocar en los estados cercanos a la región. Se sabe que en el área de Mexcaltitlán y Santiago Ixcuintla existen platillos regionales en donde el camarón es el ingrediente principal, razón por la cual es posible que hasta un 30% del consumo sea regional y local. La forma de organización principal en la región es la cooperativa pesquera, aunque se registran algunos pescadores libres. En base a la participación pesquera en la zona de estudio se cuenta con una vulnerabilidad media, ya que existen en las áreas estuarinas condiciones naturales de oxigenación, nutrientes para el aprovechamiento de los recursos pesqueros. La actividad pesquera depende de la existencia del recurso natural y la RBMN es una zona con una alta vocación acuícola, por lo que la actividad pesquera se encuentra





concentrada en toda la zona de estudio y cuenta con un nivel de presión media, debido a los métodos de intensificación y explotación de los recursos no controlado y el cual no es reportado (La Jornada Ecológica, 2012)

### Sector terciario

En la actualidad la zona de estudio ha tenido un crecimiento en el sector hotelero, restaurantero y otros y por lo que se refiere a la recepción de turismo, este ha tenido un crecimiento por lo cual ha generado empleos directos e indirectos.



Figura 33. Usos del manglar en la acuicultura (Berlanga, 2012).





## Recursos utilizados

Para analizar los cambios en la de cobertura de manglar y cultivos camaroneros en la RBMN Sinaloa-Nayarit durante los años 1990, 2000 y 2014 se hizo uso de los siguientes recursos.

## Imágenes de satélite

Imágenes de satélite Landsat para cada fecha de estudio, adquiridas del banco de imágenes de Landsat GeoCover en Global Land Cover Facility (GLCF) y United State Geological Survey (USGS)/EarthExplorer.

Satélite/Sensor	Path/Row	Resolución Espectral	Resolución Espacial	Fecha de adquisición
Landsat 5 TM	31/44 31/45	Rango espectral: 0,45 a 12,5 micras Número de bandas : 7	30 m (120 m – térmico)	1990-04-06
Landsat 7 ETM+	31/44 31/45	Rango espectral : 0,45 a 12,5 micras Número de bandas: 8	30 m (60 m-térmico, 15m pancromático)	2000-12-21
Landsat 8 OLI	31/44 31/45	Rango espectral : 0.43 a 1.39 micras Número de bandas : 9	30 m (15 m-pan, 100 -TIRS)	2014-08-15

**Tabla 12.** Especificaciones de las imágenes de satélite utilizadas (elaboración propia).





## Software

- ArcGis 10.2.2
- Envi 5.0

Conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Producido y comercializado por ESRI.; bajo el nombre genérico ArcGis se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

Acrónimo (de "Medio Ambiente para la Visualización de Imágenes) que se le da al Software cuya aplicación informática es aplicada para procesar y analizar imágenes geoespaciales.

## Procesamiento

### Tratamientos previos a las imágenes

#### Corrección geométrica

Las imágenes Landsat utilizadas para este estudio se presentan en formato Geotiff, lo cual permite importarlo directamente a algún programa SIG y de tipo nivel 1G, esto es que la imagen esta corregida geométricamente y radiométricamente, es decir se determina a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estándar (UTM, CCLambert, etc.). Lo que da como resultado la georreferenciación de la imagen, cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud, y no sufre distorsiones relacionadas con la plataforma del satélite.

#### Corrección radiométrica

Sabemos que el objetivo de la corrección radiométrica es pasar de niveles digitales de la imagen a valores de reflectancia. Para este estudio se requiere realizar la correcciones radiométricas de las





imágenes que corresponden al satélite Landsat 7, cuyo sensor es ETM+, debido a que los ND presentan una variación en cada banda, ya que los detectores del ETM+ han perdido la capacidad de respuesta con el paso del tiempo, por este motivo se recalcularon los valores de los coeficientes de calibración tomando como referencia la Tabla 13 de Rango espectral para el sensor ETM+ que proporciona la NASA, para realizar dicha conversión.

### Valores de Radiancia

Los productos de tipo nivel 1G descargados de USGS representan píxeles de la imagen convertidos en unidades de luminosidad absoluta utilizando cálculos de punto flotante de 32 bits. Los valores de píxel son entonces escalados a valores de bytes antes de la salida a los medios de comunicación. Por lo que se procedió a utilizar la siguiente ecuación para convertir de números digitales (ND) en un producto 1G de nuevo a las unidades de radiancia, haciendo uso del el software ArcGis 10.2.2, por medio del algebra de mapas.

$$L_{\lambda} = (Gain * DN) + Bias$$

Donde:

$L_{\lambda}$ : Radiancia espectral medida en (watts /  $m^2 * srad * \mu m$ )

DN: Niveles Digitales

Los datos de calibración GAIN y BIAS se obtienen del metadato, que es un archivo de lectura que proporciona el satélite Landsat para cada imagen descargada, que describe la información sobre las características de adquisición de la imagen.

$$Gain = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}$$

$$Bias = L_{min\lambda} - (Gain * Q_{calmin})$$





Las imágenes del sensor ETM+ se obtienen en un estado de baja o de alta ganancia (Low Gain o High Gain). El objetivo de utilizar dos ajustes es aprovechar al máximo los sensores de 8 bits de resolución radiométrica sin saturar los detectores. El modo de baja ganancia se utiliza para las superficies de la imagen con un brillo alto (mayor rango dinámico, pero baja sensibilidad), y el modo de alta ganancia se utiliza para las superficies de la imagen con un brillo bajo (menor rango dinámico pero alta sensibilidad). Este estado de ganancia se encuentra indicado para cada banda en el metadato.

Los  $L_{min\lambda}$  y  $L_{max\lambda}$  son las radiancias espectrales para cada banda en números digitales entre 0 a 255 (es decir  $Q_{calmin}$ ,  $Q_{calmax}$ ). Estos valores se determinan antes del lanzamiento del satélite y cambian de acuerdo con el tipo de sensor.

Número de banda	Antes de Julio 1 de 2000				Después de julio 1 de 2000			
	Low Gain		High Gain		Low Gain		High Gain	
	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
1	-6.2	297.5	-6.2	194.3	-6.2	293.7	-6.2	191.6
2	-6.0	303.4	-6.0	202.4	-6.4	300.9	6.4	196.5
3	-4.5	235.5	-4.5	158.6	-5.0	234.4	-5.0	152.9
4	-4.5	235.0	-4.5	157.5	-5.1	241.1	-5.1	157.4
5	-1.0	47.70	-1.0	31.76	-1.0	47.57	-1.0	31.06
6	0.0	17.04	3.2	12.65	0.0	17.04	3.2	12.65
7	-0.35	16.60	-0.35	10.932	-0.35	16.51	-0.35	10.80
8	-5.0	244.0	-5.0	158.40	-4.7	243.1	-4.7	158.3

Tabla 13. ETM+ Rango espectral (Landsat Science, 2015).

$Q_{cal}$  = El valor del pixel calibrado cuantificado en ND.

$L_{min\lambda}$  = La radiancia espectral que se escala a  $Q_{calmin}$  en (watts /  $m^2 \cdot srad \cdot \mu m$ )

$L_{max\lambda}$  = La radiancia espectral que se escala a  $Q_{calmax}$  en (watts /  $m^2 \cdot srad \cdot \mu m$ )

$Q_{calmin}$  = el valor del pixel calibrado mínimo cuantificado (correspondiente a  $L_{min\lambda}$ ) en ND.

$Q_{calmin}$  = 1 para los productos de GLP

$Q_{calmin}$  = 1 para los productos procesados NLAPS después de 04/04/2004





Qcalmin = 0 para los productos procesados NLAPS antes de 05/04/2004

Qcalmax = El valor del pixel máximo calibrado (correspondiente a Lmaxλ) en ND.

Qcalmax = 255

### Valores de Reflectancia

La segunda parte de calibración es pasar de valores de radiancia a valores de reflectancia haciendo uso de la siguiente ecuación.

$$\rho_{\lambda} = \left( \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s} \right)$$

Donde:

$\rho_{\lambda}$  = Reflectancia

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral medida por el sensor

d = Distancia del sol a la tierra en unidades astronómicas, interpolada a partir del día juliano de la toma de la fecha de la escena

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

$\theta_s$  = Ángulo cenit solar

Distancia Tierra-Sol en unidades Astronómicas									
Día de año	Distancia	Día de Año	Distancia	Día de año	Distancia	Día de año	Distancia	Día de año	Distancia
1	0.98331	74	0.99446	152	1.01403	227	1.01281	305	0.99253
15	0.98365	91	0.99926	166	1.01577	242	1.00969	319	0.98916
32	0.98536	106	1.00353	182	1.01667	258	1.00566	335	0.98916
46	0.98774	121	1.00756	196	1.01646	274	1.00119	349	0.98426
60	0.99084	135	1.01087	213	1.01497	288	0.99718	365	0.98333

Tabla 14. Distancia Tierra-Sol en unidades Astronómicas (Landsat Science, 2015).





Promedio de irradiancia solar exatmosférica para el sensor ETM+	
Banda	watts/(metro cuadrado*m)
1	1970
2	1842
3	1547
4	1044
5	225.7
7	82.06
8	1369

**Tabla 15.** Promedio de irradiancia solar exatmosférica para el sensor ETM+. Última fecha de actualización 29 de julio de 2013 (*Landsat Science, 2015*).

### Edición de imágenes multispectrales del área de estudio

A partir de las 6 imágenes Landsat se procedió a generar 3 mosaicos de los path/row 31/44 y 31/45 correspondientes a cada año de estudio, a partir de una composición 354, para Landsat 5 y 7 y 654, para Landsat 8, pues fue la combinación que más se adecuó para el análisis de la cobertura de mangle en este estudio. Las imágenes fueron referenciadas al sistema de proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator (UTM), zona 13N, con Datum WGS84, para su posterior acotamiento a los límites del polígono de la RBMN.

### Análisis de cobertura de manglar

Para el análisis sobre la cobertura de manglar en la RBMN se realizó a través de dos métodos, primero por análisis mediante clasificación supervisada para generar mapas temáticos y de la substracción de imágenes de índice normalizado de vegetación (NDVI).





## Clasificación supervisada

A partir de los tres mosaicos generados por las escenas Landsat de cada año de estudio, se obtuvo la cobertura del manglar por medio de la clasificación supervisada, los mosaicos se clasificaron de manera independiente, utilizando el mismo proceso y el mismo esquema de clasificación, obteniendo el mismo número de clases, con el fin de hacer una comparación de las imágenes clasificadas a través de mapas temáticos. La clasificación supervisada se realizó con el algoritmo de Máxima verosimilitud ya que se basa en la probabilidad de que un pixel, con una respuesta espectral específica, pertenezca a una clase determinada, cuya firma espectral está contenida en los campos de entrenamiento (Lillesand & Kiefer, 1994). El algoritmo usa los datos de entrenamiento para estimar la media y varianza de la brillantes de las clases en cada una de las bandas espectrales disponibles, las cuales son usadas para estimar la probabilidad de un pixel n particular pertenezca a una de las clases definidas con anterioridad (Campbell, 1996). Las clases utilizadas en el proceso de clasificación supervisada a través del software Arcgis 10.2.2, fueron:

Clase	Descripción.
Agricultura	Terrenos agrícolas que se cultivan antes o después de la temporada de lluvias terrenos agrícolas abandonados sin vegetación al momento de tomar la imagen. Zonas que se utilizan para actividades pecuarias (pastizales).
Cuerpos de agua	Mar y sistemas estuarios con comunicación permanente o intermitente con el mar; bahías, esteros y lagunas.
Mangle	Tipo de vegetación que se desarrolla en las áreas bajas y fangosas de las costas, en esteros, lagunas costeras y estuarios de ríos, siempre bajo la influencia de agua salobre. Se caracteriza por que alguno de sus componentes presenta raíces en forma de zancas. Las plantas que lo forman reciben el nombre de mangles. Los principales son: Rizophora mangle (mangle rojo), avicennia germanians (mangle negro), Laguncularia racemosa (mangle blanco)
Otro suelo sin vegetación aparente	Marismas: áreas de suelos salinos sujetas a inundación temporal por acción de mareas con o sin cobertura vegetal, arenas, otros.





Clase	Descripción.
Otra vegetación	Abarca todos los tipos de bosques tropicales (selva baja caducifolia, selva media subcaducifolia, etc.), así como los bosques templados que se encuentran en áreas de montañas principalmente (bosque de pino-encino, etc.). Vegetación herbácea y/o arbustiva en alguna etapa temprana de crecimiento.

Tabla 16. Clases para la clasificación supervisada (elaboración propia).

Agrupando diferentes subclases en una sola cobertura sin perder el concepto permitió una síntesis más adecuada para la interpretación.

El proceso de clasificación supervisada comenzó con la digitalización de los campos de entrenamiento sobre compuestos en falso color 543 y 654, para Landsat 5, 7 y 8 respectivamente debido a que las imágenes resultantes de estas combinaciones fueron las que más se facilitaron el reconocimiento de las coberturas para su delimitación y la extracción de la firma espectral de cada una de las clases.

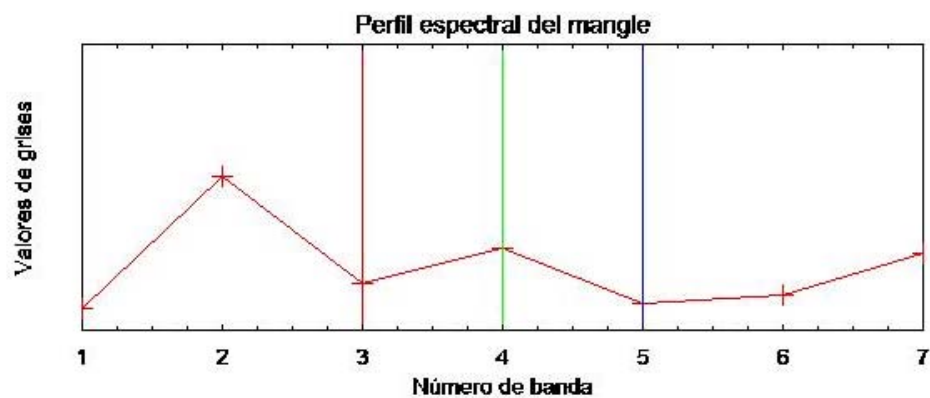


Figura 34. En rojo firma espectral del mangle, RBMN, imagen Landsat-5 TM del año 1990. Combinación de bandas 5 (infrarrojo medio), 4 (Infrarrojo cercano), 3(Rojo).Obtenida a partir del software Envi 5.0 (elaboración propia).





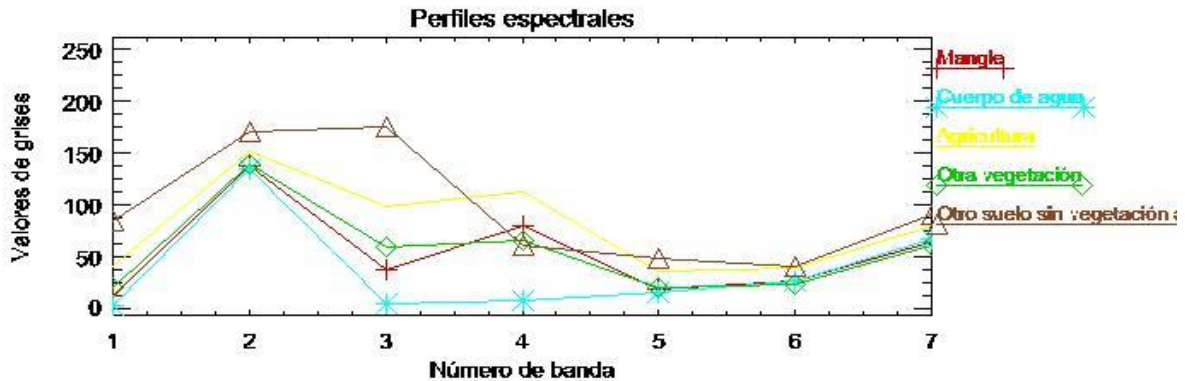


Figura 35. Colección de curvas espectrales para la clasificación supervisada (elaboración propia).

### Generación de mapas temáticos de la cobertura de mangle y cultivos camaroneros

A los mapas temáticos resultantes de la clasificación supervisada de las escenas multispectrales de cada año de estudio, se añadió como dato auxiliar los polígonos de los cultivos camaroneros (Camaronicultura). Para ello estos datos fueron digitalizados en pantalla sobre la misma composición en falso color 543 y 654, para Landsat 5,7 y 8 respectivamente. La digitalización consiste en crear vectores en forma de polígonos que posteriormente se convierten en imágenes raster con los mismos parámetros espaciales del mapa temático resultante de la clasificación, el cual se transponen como mascarar.

### Evaluación de la exactitud

Un problema común del procesamiento de imágenes multispectrales con fines de clasificación de tipos de cobertura es la confusión de respuestas espectrales y de atributos. Así, objetos diferentes pueden poseer la misma o parecida respuesta, con el cual pasan a formar parte de la misma clase espectral; igualmente, un objeto puede tener un comportamiento espectral diverso, con lo cual una





clase de información individual, o tributo, puede corresponder a diferentes clases espectrales lo que finalmente se ve incluido en cierta incertidumbre en los resultados de la clasificación.

Para determinar la exactitud de una clasificación se hace uso del análisis de una matriz de error. Una matriz de error es un arreglo que expresa el número de unidades de muestra asignados a una clase particular en una clasificación con relación al número de unidades de muestras asignadas a la misma categoría, pero en otra clasificación que es considerada como correcta (datos de referencia o prueba). Las columnas usualmente representan los datos de referencia, en tanto que los renglones elementos obtenidos de la clasificación generada.

A partir de la matriz de error pueden calcularse otras medidas de exactitud, la total, la del productor y la del usuario, además de un estimador del coeficiente de Kappa ( $k'$ ).

La exactitud total es el cociente de la sumatoria de las unidades de muestra en la diagonal principal (unidades correctamente clasificadas) entre el total de unidades de muestra de la matriz de error expresado en porcentaje. Entre más pobres sean los resultados de la clasificación, el resultado tendera a cero, valores altos en la clasificación tendera a cien.

La exactitud del productor y del usuario son medidas individuales para cada categoría de la clasificación, la exactitud del productor resulta de dividir las unidades correctamente clasificadas en una categoría dada, entre el número de unidades de muestra para esa categoría dentro de los datos de referencia (sumatoria de la columna de la categoría); en tanto que la exactitud del usuario se obtiene dividiendo las unidades correctamente clasificadas entre el número de unidades en la clasificación generada (sumatoria del renglón de la categoría; Martínez, 2003).

El estadístico Kappa ( $k'$ ), cuyo valor puede variar entre 0 y 1, es indicativo (expresado en porcentaje) de que tanto mejor es un a clasificación supervisada, en comparación con una asignación de valores a los pixeles en cuestión. Esta medida toma en cuenta, para su estimación, los datos del número total





de píxeles considerados, el número total de píxeles correctamente clasificados y la suma de los productos del número de píxeles en cada fila y cada columna (Lillesand, 1994).

		J= columnas (datos de referencia)			Total de Renglones $n_{i+}$
		1	2	K	
i = renglones (clasificación)	1	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{1k}$	$n_{1+}$
	2	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{2k}$	$n_{2+}$
	k	$n_{k1}$	$n_{k2}$	$n_{kk}$	$n_{k+}$
	Total columna $n_{+j}$	$n_{+1}$	$n_{+2}$	$n_{+k}$	$N$

Tabla 17. Matriz de error (Congalton & Green, 1999; Richards & Jia, 1999).

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

$X_{ij}$  es el valor de la sumatoria de clase i en el renglón j y representan unidades de muestreo correctamente clasificadas.

$$n_{i+} = \sum X_{ik} \text{ (sumatoria de todos los valores de las columnas en el renglón i).}$$

$$n_{j+} = \sum X_{kj} \text{ (sumatoria de todos los valores de los renglones en la columna j).}$$

Entonces:

$$\text{Exactitud del productor} = \frac{n_{jj}}{n_{+j}}$$

$$\text{Exactitud del usuario} = \frac{n_{jj}}{n_{i+}}$$

$$\text{Exactitud total} = \frac{\sum X_{jj}}{N}$$

Estimador del coeficiente de Kappa ( $K'$ ) es definido por:





$$K' = \frac{N \sum n_{jj} - \sum n_{i+} n_{+j}}{N^2 - \sum n_{i+} n_{+j}}$$

$K'$  toma valores en el intervalo de cero a uno. Cuando es significativamente diferente de cero el proceso de clasificación es mejor que el de una clasificación debida al azar (Mas, 1999).

La matriz de error se obtuvo a partir de la herramienta pivot tablet del módulo Table /Data Management Tools del software Arcgis10.2.2, comparando el mapa raster final producto de la clasificación supervisada (mapa temático), con los datos reales de las clases de información presentes en el espacio (datos de referencia, datos de campo, datos de cartas geográficas etc.). Con esta matriz se pretende saber qué porcentaje de exactitud tenemos de que las clases que se asignaron a la clasificación correspondan realmente a lo que se encuentra en el espacio geográfico.

Para conocer las exactitudes de los mapas temáticos de los años 1990, 2000 y 2014 se tomaron al azar 50 puntos por clase a partir de los mapas en formato shapefile (formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos) de uso de suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares, Región Pacífico Norte (1981, 2005 y 2010), escala 1:50 000 de CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), ya que fue el material del que se dispuso. Dichos (datos de referencia) fueron comparados con las respectivas clasificaciones de cada año en el estudio para generar las matrices de error.

### Tasa de deforestación de la cobertura de manglar

A partir de los cambios identificados en la cobertura de manglar durante el periodo de estudio, se evaluó su tasa de deforestación con la fórmula empleada por el Instituto Nacional de Ecología (2005) y propuesta por la FAO en 1996.





$$r = 1 - \left[ 1 - \frac{A_1 - A_2}{A_1} \right]^{\frac{1}{t}}$$

Donde:

R=Tasa de cambio (Para expresarla en % se multiplica por 100)

A<sub>1</sub>= Cobertura inicial

A<sub>2</sub>=Cobertura final

t= Número de años entre las dos fechas.

### Índice normalizado de vegetación (NDVI)

La segunda etapa del análisis de la cobertura de mangle fue por la sustracción del NDVI estimado a partir de las bandas 3 y 4 del Landsat 5 como 7, y las bandas 4 y 5 para el Landsat 8.

Una vez estimados los índices de vegetación de cada año se realizó un mapa temático de cada año de estudio.



## Tratamientos previos a las imágenes

Corrección radiométrica para las imágenes del sensor ETM+.

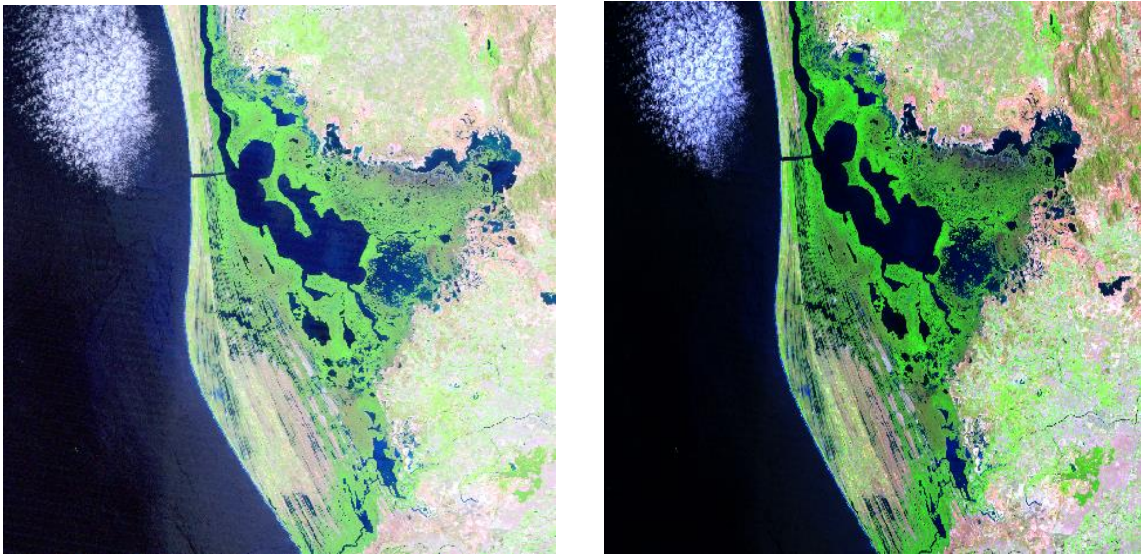


Figura 36. Corrección radiométrica de imágenes Landsat 7 .

## Mapas temáticos de la cobertura del manglar y cultivos camarones.

Los mapas temáticos de las cobertura de manglar y cultivos camarones de la RBMN de 1990, 2000 y 2014 producidos apartir de la clasificación supervisada de imagenes Landsat TM, ETM+ Y OLI se muestran en las figuras siguientes.





### Clasificación Supervisada para la imagen 1990 Sensor TM

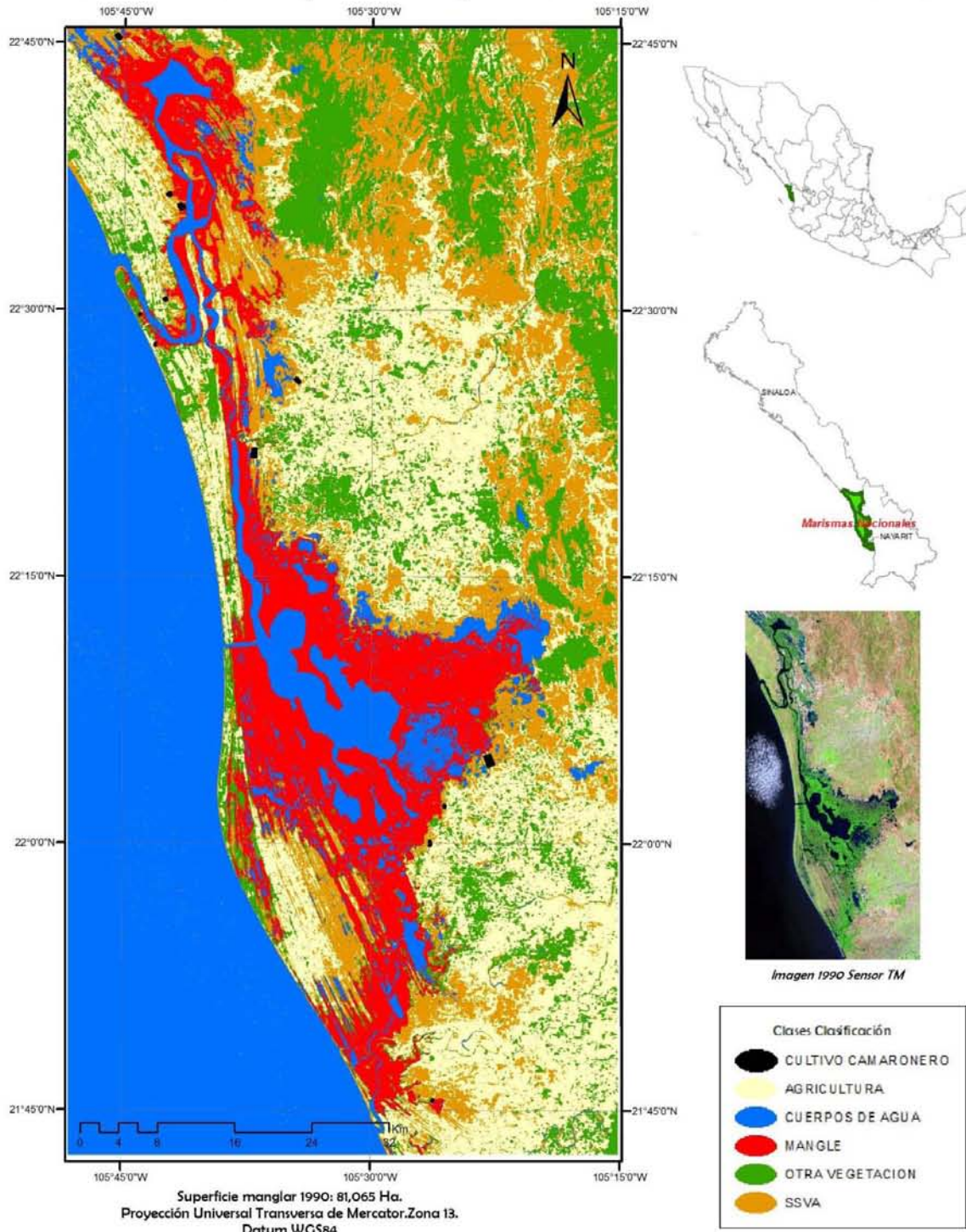


Figura 37. Clasificación para la imagen de Landsat 5. (Elaboración propia).





### Clasificación Supervisada para la imagen 2000 Sensor ETM+

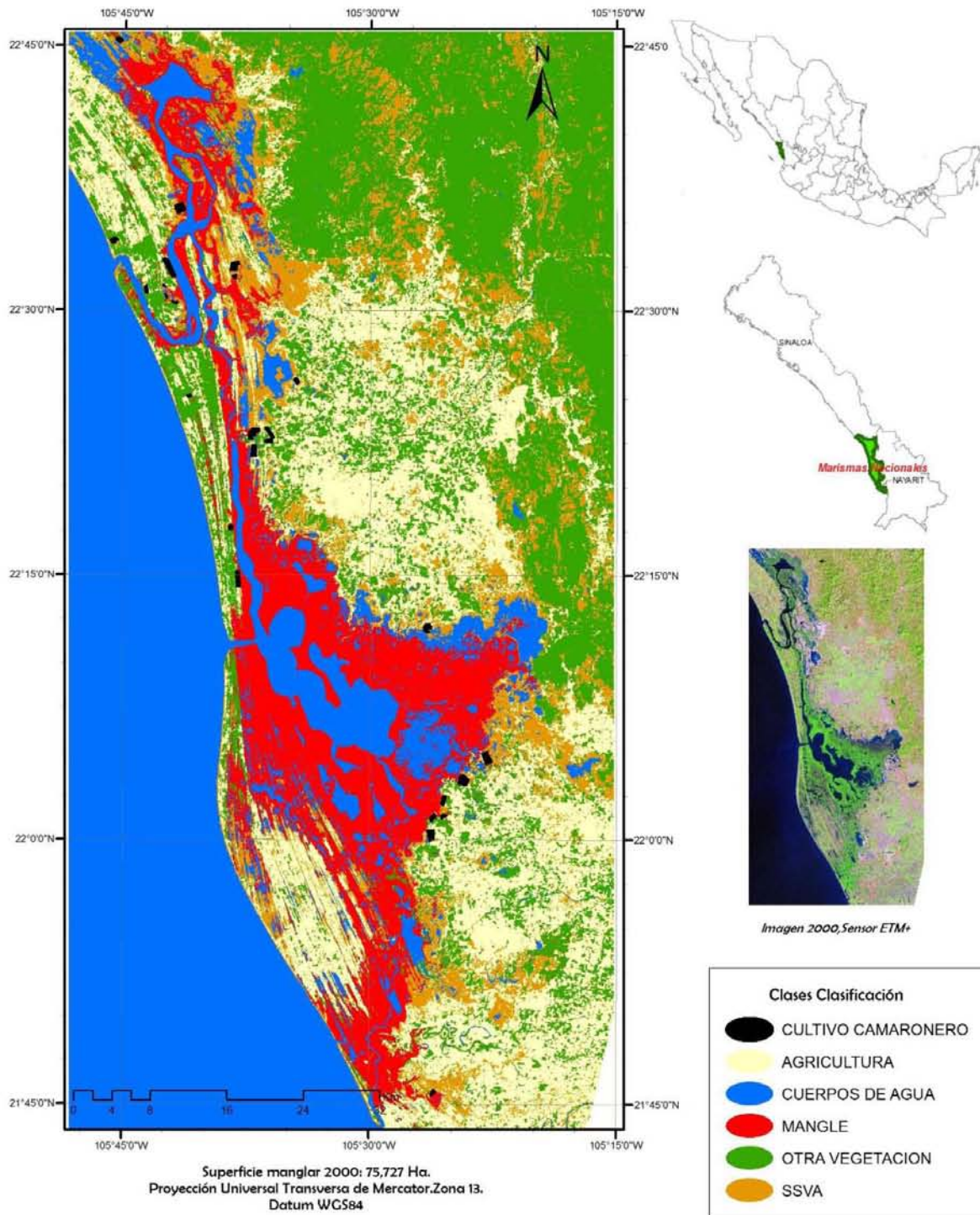


Figura 38. Clasificación para la imagen de Landsat 7 (Elaboración propia).





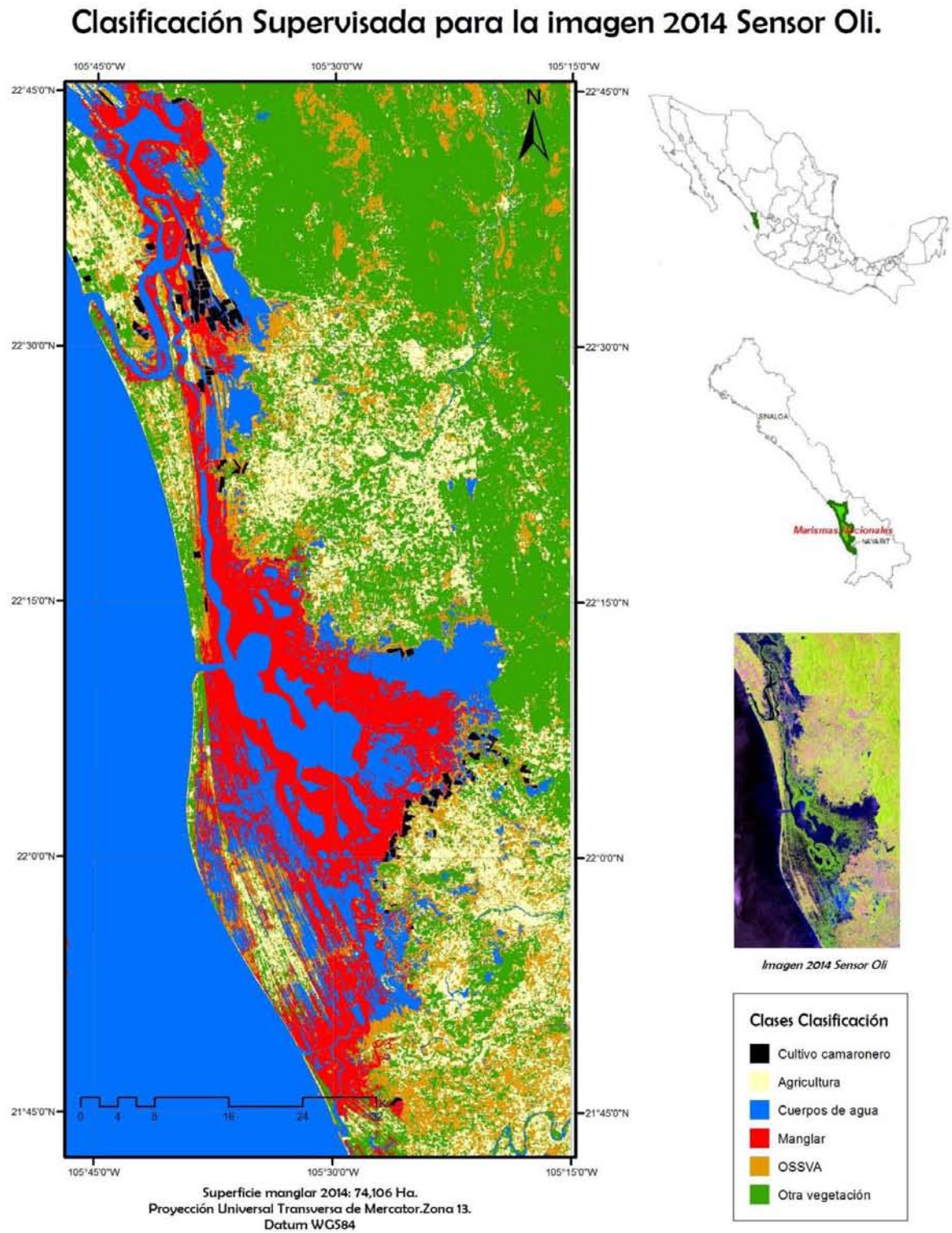


Figura 39. Clasificación para la imagen Landsat 8. (Elaboración propia).





## Evaluación de la exactitud

El mapa temático de 1990 se produjo con una exactitud total de 97.21% y un estimador del coeficiente de Kappa ( $k'$ ) de 96%, para un total de 50 puntos de prueba. La clase de manglar fue clasificada con exactitudes del productor y usuario del 100%. Así mismo, la clase agricultura fue la de menor exactitud del usuario con un 94% (Tabla 18).

Clasificación	Referencias					Total	Exactitud del usuario
Manglar	50	0	0	0	0	50	100%
Cuerpos de agua	0	50	0	0	0	50	100%
Agricultura	0	0	48	2	1	51	94%
Otra vegetación	0	0	0	49	2	51	96%
Ossva	0	0	2	0	47	49	96%
Total	50	50	50	51	50	251	
Exactitud del productor	100%	100%	96%	96%	94%		
Exactitud Total	97.21%		K'=0.96%				

Tabla 18. Matriz de error para la imagen Landsat 5/ Sensor TM 1990 (Elaboración propia).

Para el mapa temático de 2000 se produjo con una exactitud total de 97.25% y un estimador del coeficiente de Kappa ( $k'$ ) de 96%, para un total de 50 puntos de prueba. La clase de manglar fue clasificada con una exactitud del usuario de 98%. Y el productor del 96%. Así mismo, la clase agricultura y Otra vegetación fueron las de menor exactitud del usuario con un 96% (Tabla 19).

Clasificación	Referencias					Total	Exactitud del usuario
Manglar	49	0	0	1	0	50	98%
Cuerpos de agua	1	51	0	0	0	52	98%
Agricultura	0	0	50	0	2	52	96%
Otra vegetación	1	0	0	50	1	52	96%
Ossva	0	0	1	0	48	49	98%
Total	51	51	51	51	51	255	
Exactitud del productor	96%	100%	98%	98%	94%		
Exactitud Total	97.25%		K'=0.96%				

Tabla 19. Matriz de error para la imagen Landsat 7/ Sensor ETM+ 2000 (Elaboración propia).





El mapa temático de 2014 se produjo con una exactitud total de 99.21% y un estimador del coeficiente de Kappa ( $k'$ ) de 99% , para un total de 50 puntos de prueba. La clase de manglar fue clasificada con exactitud del usuario del 100 %. Así mismo, la clases Otra vegetación y Otro suelo sin vegetación aparente (Ossva) fueron las de menor exactitud por el usuario con un 98% (Tabla 20).

Clasificación	Referencias					Total	Exactitud del usuario
Manglar	50	0	0	0	0	50	100%
Cuerpos de agua	0	50	0	0	0	50	100%
Agricultura	0	0	50	0	0	50	100%
Otra vegetación	0	0	1	50	0	51	98%
Ossva	1	0	0	0	50	51	98%
Total	51	50	51	50	50	252	
Exactitud del productor	98%	100%	98%	100%	100%		
Exactitud Total	99.21%		K'=0.99%				

Tabla 20. Matriz de error para la imagen Landsat 8 / Sensor OLI 2014 (Elaboración propia).

La cobertura de manglar en el año de 1990 fue de 81,065 ha, para el año 2000 fue de 75,727 ha y para el año 2014 fue de 74,106 ha. En la figura 40 se presenta la distribución del espacio que era ocupado por el manglar durante cada año de estudio. La tasa media de deforestación anual para todo el periodo analizado 1990-2014 (24 años) se estimó en 0.38% anual. En los años analizados, el bosque de mangle mostró tendencias de cambio negativas.



MAPA TEMÁTICO DE LA COBERTURA DE MANGLAR EN  
MARISMAS NACIONALES POR CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE IMAGENES LANDSAT TM, ETM+ Y OLI.

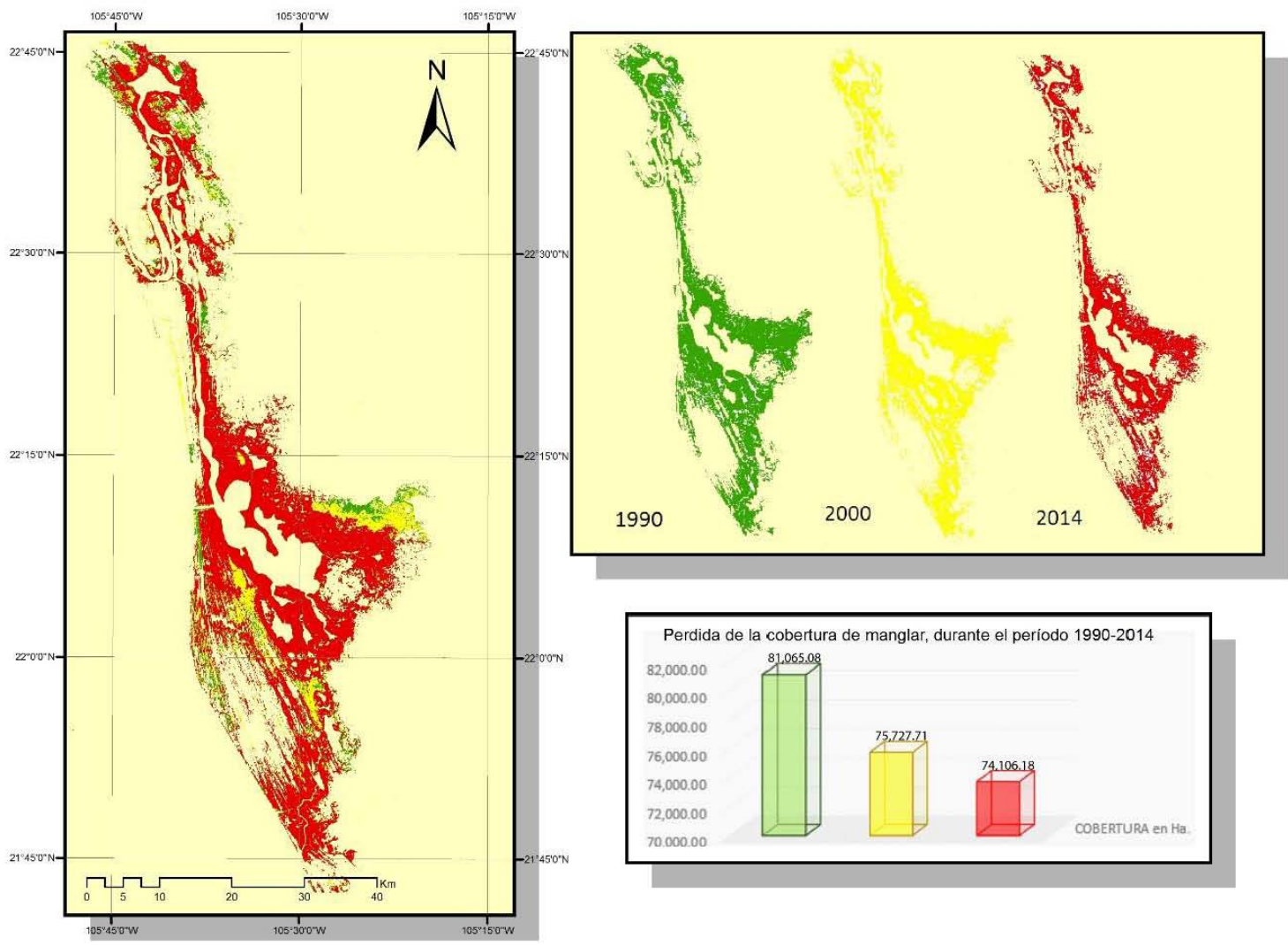


Figura 40. Pérdida de cobertura de manglar en la RBMN de 1990 a 2014. (Elaboración propia).



## Cultivos Camaroneros

La camaronicultura mostró una tendencia de crecimiento, pues en el año de 1990 un total de 811 ha de cultivos camaroneros habían sido construidas, para el año 2000 se cuantificó un total de 1,017 ha y para el año 2014 un total de 4,743 ha.

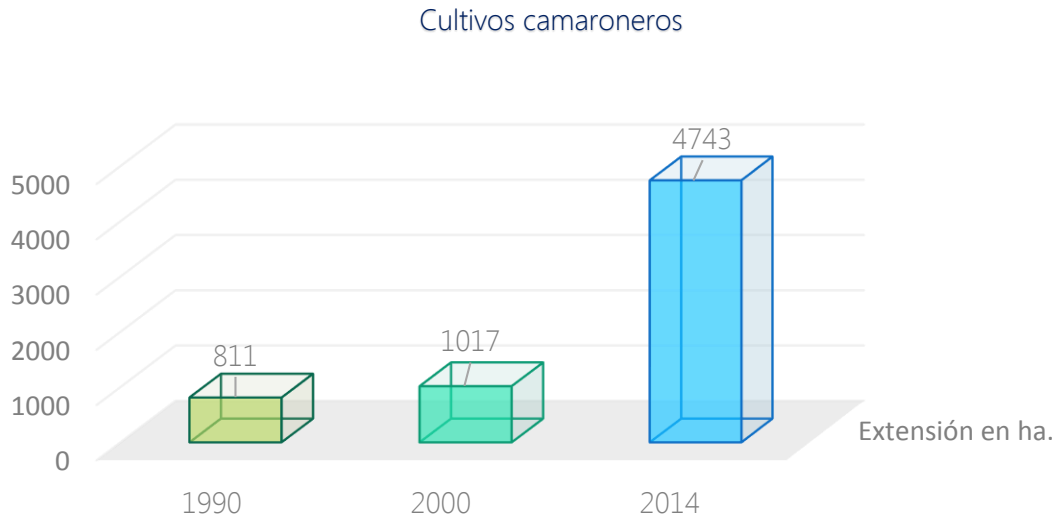
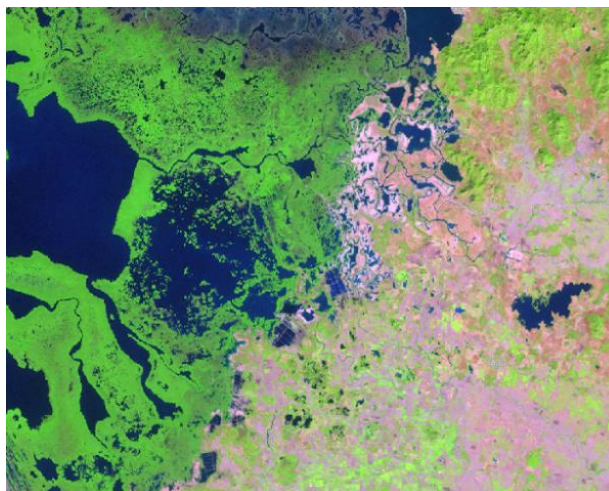
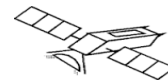


Figura 41. Comparación del crecimiento de cultivos camaroneros en la RBMN periodo 1990-2014. (Elaboración propia).

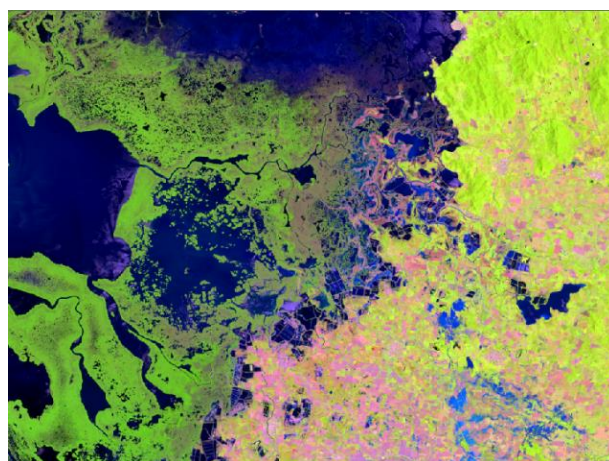


Cultivos camaroneros en 1990





Cultivos camaroneros 2000



Cultivos camaroneros 2014.

**Figura 42.** Crecimiento de la industria camaronera durante el periodo 1990-2014.

### Diferenciación de imágenes con el NDVI en la RBMN

Los mapas del índice normalizado de vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) obtenidos a partir de las bandas 3 y 4 de los sensores TM y ETM+ para las escenas de los años 1990 y 2000 así como las bandas 4 y 5 del sensor OLI para la escena de 2014 se muestran en la Figura 43.





Mapas del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del manglar en Marismas Nacionales a partir de imágenes Landsat TM, EMT+ y OLI.

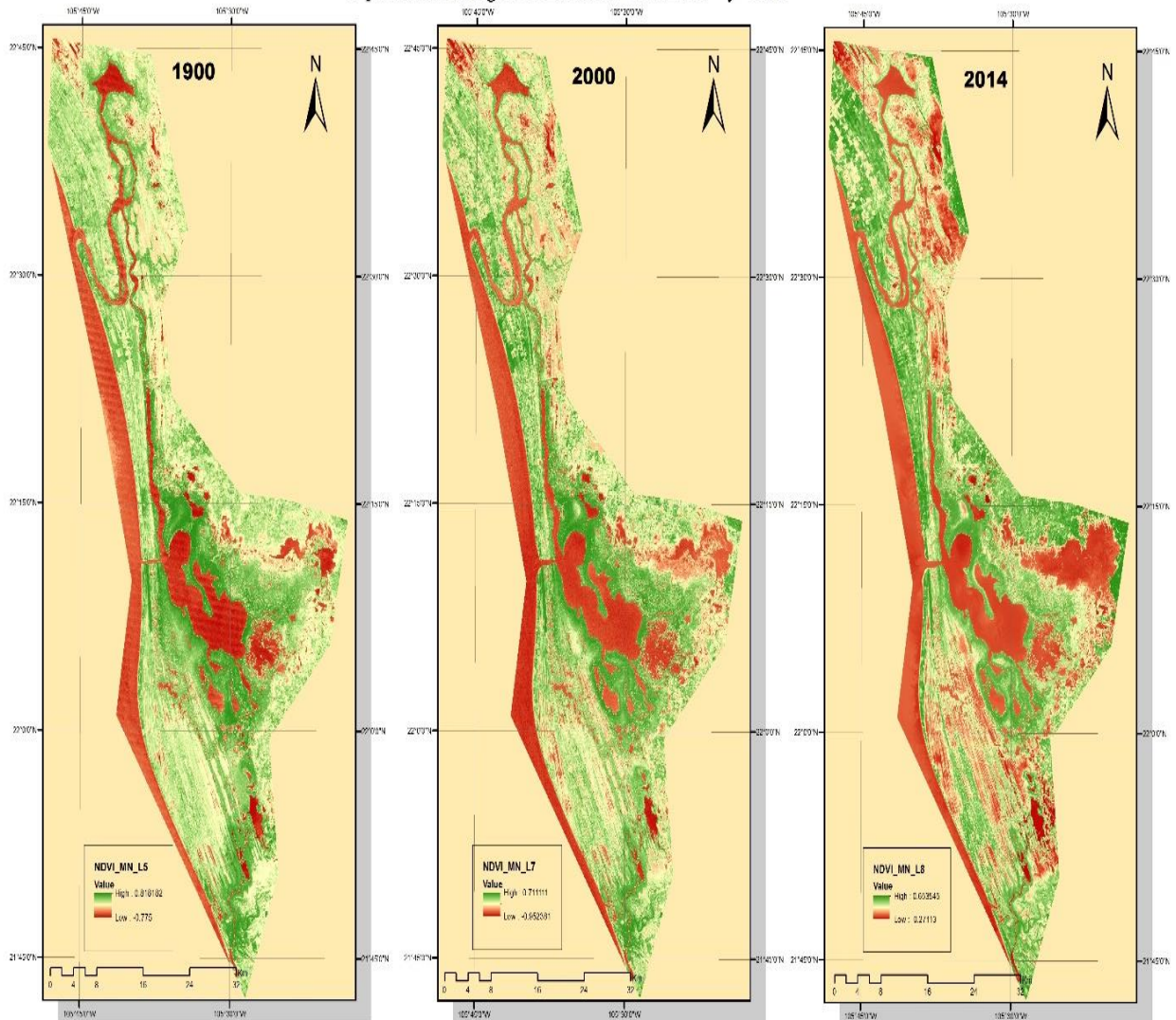


Figura 43. Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) de RBMN, Sinaloa-Nayarit, coordenadas de los mapas en UTM zona 13N, Datum WGS84. (Elaboración propia).

En 1990 la media del NDVI fue de 0.09 y la desviación estandar de 0.26, en 2000 de 0.06 y 0.29, respectivamente y en 2014 la media fue de 0.24 y la desviación estandar 0.25. estas estadísticas fueron calculadas para la población entera de mangle que conforma la RBMN partiendo del hecho de que la escala considerada es de -1 a 1 donde 0 es un escenario sin cambio y solo los valores positivos representan variaciones. Comparando las tres imágenes se observa que durante 1990 hay





mayor cantidad de vegetación de manglar y poca vegetación en lo que respecta a la actividad agrícola alrededor de la RBMN que para los años 2000 y 2014 se observa una clara disminución de la vegetación del manglar y un aumento en la actividad agrícola, para este último la etapa agrícola se encuentra en una fase superior de allí que se presenta una mayor intensidad en verde. Cabe señalar que para este caso han influido las fechas de toma de las escenas dado que las imágenes de 1990 y 2000, corresponden a diciembre y abril respectivamente, épocas consideradas como inicio y fin de invierno, donde la vegetación se encuentra nula o en inicio de crecimiento.

Además de lo anterior, la topografía del área de estudio, y el ángulo solar son factores que pueden modificar la reflectancia de las imágenes tomadas.

NDVI			
ESTADÍSTICAS	1990	2000	2014
MÍNIMO	-0.8	-0.95	-0.27
MÁXIMO	0.9	0.73	0.65
PROMEDIO	0.09	0.06	0.24
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.26	0.29	0.25
GRÁFICA			

Tabla 21. Estadísticas del índice normalizado de vegetación (NDVI) en la RBMN. (Elaboración propia).





## Conclusiones

El análisis de los mosaicos generados a partir de imágenes multispectrales para el periodo de estudio en la RBMN permitió determinar una pérdida de extensión total de 6,959 ha de cobertura de manglar durante los 24 años con una tasa de deforestación del 0.38% anual. Estas pérdidas se debieron principalmente a los efectos directos e indirectos del crecimiento de las granjas camarónicas, ya que para el final del periodo de análisis, en el año 2014, hubo una extensión total de 4,743 ha en la zona costera de la RBMN presentando un crecimiento real de 3,932 ha de granjas camarónicas comparadas con las 811 ha que existían en 1990.

Aunado a ello, en el mapa de NDVI (Índice de Vegetación Normalizado) se puede apreciar el deterioro y la pérdida del manglar durante los 24 años que comprendió este estudio, cabe destacar que el crecimiento de las granjas para la producción de camarón desarrolladas sobre este tipo de hábitat dentro de la zona costera, no es uno de los factores primordiales de la pérdida de esta especie, sin embargo, es de notar que solamente son las diversas perturbaciones de origen antropogénico más que las de origen natural, ya que en los últimos años no se han reportado grandes eventos naturales como huracanes que lleguen a deteriorar a gran escala al manglar, el daño natural se puede considerar por la abertura del canal de Cuautla para conectar la laguna Agua Brava con el océano Pacífico para incrementar la producción pesquera en la región, debido a que se está erosionando y modifica continuamente los patrones de circulación y propiedades fisicoquímicas del agua, lo que ha provocado mortalidades considerable del manglar adicional al impacto por la apertura del canal, se debe considerar que los impactos generados por la construcción de canales, drenes, caminos y la agricultura sobre los humedales afectan la estructura y la extensión de los mismos.

El presente trabajo confirma que el análisis digital de imágenes de satélite así como la información en formato digital, como es el caso de cartas topográficas y mapas temáticos en formato shapefile, son una herramienta económica y eficiente para realizar monitoreo anual sobre la cobertura de los



## Conclusiones.



bosques de los manglares y dar seguimientos a sus posibles cambios de condición, estructura y extensión de los mismos, como es el caso de la RBMN.

Debido a que la RBMN ha sido estudiada con anterioridad utilizando métodos de Percepción Remota (Berlanga, 2006; Conabio, 2009), permite la comparación de resultados y se encuentran los reportes de las estimaciones discordantes en cuanto a la extensión de manglar y de cultivos camaroneiros, por ésta razón se sugiere realizar mediciones in situ, para corroborar los resultados y la precisión obtenidos en la región de estudio en el periodo de análisis, trabajo de campo que requiere presupuesto, por tal motivo se usan los datos de CONABIO, como referencia para establecer los parámetros a usar, metodología que resulta útil para la escala establecida de análisis.

La construcción y mantenimiento de una industria mal planeada, como lo indican los datos de pérdida de ecosistema y los de datos de ganancia de la industria camaronera, permiten alertar que de seguir adelante sin ninguna regulación o planeación futura, causará daños irreparables a la zona costera de manglar, y a los bienes y servicios que ésta genera para la sociedad, y las especies de flora y fauna dependientes de ella y dado que la presión ambiental sobre los manglares pudiera tender a aumentar en los próximos años, se recomienda que a la brevedad se establezcan lineamientos adecuados de conservación y manejo para mantener y preservar la calidad de vida de este tipo de hábitat.



## Bibliografía

- Aguilera Hernández, P. (s.f.). ¿Qué es la acuicultura? *Secretaría de Pesca*.
- Alonzo Parra, D. (2006). Manual para la conservación del pato real mexicano y su hábitat. Reporte final. *Ducks Unlimited de México*.
- Ariza, A. (2013). *Productos LDCM- Landsat 8*. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Arreola Lizárraga, J. (2004). Structure and litterfall of an arid mangrove stand on the Gulf of California, Mexico. *Aquatic Botany*.
- Beland, M. (2006). Assessment of landcover changes related to shrimp aquaculture using remote sensing data: A case study in the Giao Thuy District, Vietnam. *Int. J. Remote Sens.*
- Berlanga Robles, C. (2002). Land use mapping and change detection in the coastal zone of Northwest Mexico using remote sensing techniques. *Journal of Coastal Research*.
- Berlanga Robles, C. (2006). Evaluación en el paisaje y sus efectos sobre los humedales costeros del sistema esturiano de San Blas, Nayarit (México) por medio de análisis de imágenes Landsat. *Ciencias Marinas*.
- Berlanga, C. (2007). Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapan-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite LANDSAT. *Universidad y Ciencia*.
- Berlanga, C. (2012). Obtenido de <http://www.jornada.unam.mx/2012/12/03/eco-d.html>
- Calderón, C. (2008). Balandra: El bosque costero de la paz. *CONABIO. BioDIVERSITAS*.
- Calderón, C. (2009). El valor de los manglares. *CONABIO. BioDIVERSITAS*.
- Campbell, J. (1996). Introduction to remote sensing. *Taylor & Francis: London*.
- Campbell, Wynne, J. (2011). *Introduction to Remote Sensing. Fifth Edition*. Nueva York, London: The Guilford Press.
- Carrera, E. (2003). Inventario y clasificación de humedales en México. Parte I. *Ducks Unlimited de México*.
- Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona, España: Ariel.





- Clay, J. (1996). Markets potentials for redressing the environmental impacts of wild captured and pond produced shrimp. *World Wildlife Fund, Washington, D.C.*
- CONABIO. (2009). *Manglares de México: Extensión y distribución*. México.
- CONABIO. (2009). *Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica*. Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx>
- CONAFOR. (2009). La reforestación de los manglares en la Costa de Oaxaca. *Manual Comunitario. Zapopan, Jalisco.*
- Congalton, R. (1999). Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. *Lewis Publisher: Florida, USA.*
- Constanza, R. (1997). The value of the world's of ecosystem services and natural capital . *Nature* .
- Contreras, C. (1985). Las lagunas costeras mexicanas. *Centro de Ecodesarrollo y Secretaria de Pesca.*
- DGOT. (2013). Ortorectificación de imágenes satelitales Landsat. *Protocolo.*
- Ducks Unlimited Inc. (2005). Cambio de Uso del Suelo en la Zona Costera del Estado de Sinaloa.
- FAO. (1996). *Forest resources assessment 1990: Survey of tropical forest cover and study of change process*. Obtenido de <http://www.fao.org/>
- Field, C. (1998). Rehabilitation of mangrove Ecosystem: An Overview. *Marine Pollution Bulletin.*
- Heald, E. (1970). The contribution of mangrove swamps to Florida fisheries. Gulf Caribb. *Fish Institute.*
- Henderson, F. (1999). Mapping coastal ecosystems over a step development gradient using C-CAP protocols. *International Journal of Remote Sensing.*
- Jiménez G., F. (2001). Manual de recomendaciones para el manejo de granjas de camarón en México. *Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria.*
- Kerle, N. (2004). *Principles of Remote Sensing*. Enscheda, The Netherlands: ITC Educational Textbook.
- Kovacs, J. (1999). Assessing mangrove use at local scale. *Landscape and Urban Planning.*
- Kovacs, J. (2008). Cartografía de la condición de los manglares del Pacífico mexicano usando datos de la banda C de ENVISAT ASAR y datos ópticos de Landsat. *Ciencias Marinas.*
- Kovacs, J. M., Flores, F., Wang J. y Aspden, L., & P. (2004). Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite imagery. *Acuatic Botany.*





- La Jornada Ecológica. (2012). *La deforestación de los manglares y la pesquería del camarón en Marismas Nacionales*. Obtenido de <http://www.jornada.unam.mx>
- Lacerda, L. (1993). Ecosistemas de manglar de America Latina y Africa. Parte I: America Latina. *The International Society for Mangrove Ecosystems and International Tropical Timber Organization*.
- Lal, P. (2003). Economic valuation of mangroves and decisions-making in the Pacific. *Ocean & Coastal Management*.
- Landsat Science. (2015). Obtenido de <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Lillesand, D. (1994). Remote sensing and image interpretation. *John Wiley and Sons: New York*.
- Martínez, S. (2003). Estudio sobre el uso de suelo en las subcuencas Bahía Navachiste y Río Sinaloa al Noroeste de México. *CIAD, A.C. Unidad Mazatlán*.
- Mas, J. (1999). Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *Journal of remote sensing*.
- Muttitano, W. (2005). Land use/land cover changes in the coastal zone of Ban Don Bay. Thailand using Landsat 5 TM data. *International Journal of Remote Sensing*.
- NACA. (1994). Draft report: Workshop on environmental assesment and management of aquaculture development. *Sixth meeting of the governing council*.
- NASA. (2011). *How are color satellite images created?* Obtenido de <http://www.nasa.gov>
- Odum, W. (1975). The detritus-based food web of an estuarine mangrove community. *Estuarine Research. New York: Academic Press*.
- Palacio, P. (2004). Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. *Instituto de Geografía: México*.
- Pereira, J. (2013). *Fundamentos de la clasificación en teledetección*. Obtenido de <http://www.jpereira.net>
- Pérez Gutiérrez, Muñoz Nieto, C. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Salamanca, España: Universidad Salamanca.





- Phillips, M. (1939). Shrimp culture and the environment: Lesson from the world's most rapidly expanding warmwater aquaculture sector. *Environment and aquaculture in developing countries*.
- Primavera, J. (2000). Integrated mangrove-aquaculture systems in Asia. *ICG Publishing, London*.
- Ramírez, J. (2001). *Los Manglares*. Obtenido de <http://ponce.inter.edu/acad/cursos/ciencia/pages/manglares.htm>
- Rejas Ayuga, J. (2008). Tratamiento digital previo de las imágenes. *eo1*.
- Richards, J. (1999). Remote sensing digital image analysis. *Springer: Berlin*.
- Rönnbäck, P. (1999). The ecological basis for economic value of seafood production supported bay mangrove ecosystems. *Ecological Economics*.
- Ruiz Luna, A. (1999). Modifications in coverage patterns and land use around the Huizache-Caimanero lagoon system, Sinaloa, Mexico: A multi-temporal analysis using LANDSAT images. *Estuarine Coastal and Shelf Science*.
- SEMARNAT. (2012). Plan de manejo tipo regional para la conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de mangles en marismas nacionales, Nayarit. *Subsecretaría de Gestión para la protección Ambiental*.
- SEMARNAT-CONANP. (2005). Estudio previo justificativo para el establecimiento del área natural protegida: Área de protección flora y fauna marismas Nacionales, México. *Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas*.
- Tobey, J. (1998). Impactos económicos, ambientales y sociales del cultivo del camarón en Latinoamérica. *Centro de Recursos Costeros, Universidad de Rhode Island: Reporte de Manejo Costero*.
- Tomlinson, P. (1986). The botany of mangroves. *New York: Cambridge University Press*.
- Twilley, R. (1977). Litter dynamics in riverine mangrove forests in the Guayas River Estuary, Ecuador. *Oecología*.
- UNAM. (2011). *¿cómo ves?* Obtenido de <http://www.comoves.unam.mx>
- USGS. (2013). Descripción y corrección de productos Landsat 8. Landsat Data Continuity Mission (LDCM). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*.



## Bibliografía



USGS. (2013). *USGS*. Obtenido de <http://www.usgs.gov>

Valiela, I. (2001). Mangrove forests: One of the World's Threatened major tropical environments. *BioScience*.

Villar, R. (2001). Ficha Informativa de los Humedales. *RAMSAR*.

Walters, B. (2008). Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forest: A review. *Aquatic Botany*.

Zan, Q. (2003). Ecological assessment on the introduced *Sonneratia caseolaris* and *S. apetala* at the mangrove forest of Shenzhen bay China. *Acta Botanica Sinica*.

