



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

## ESTUDIO DEL CAMBIO ESTACIONAL DE LA RESPUESTA ESPECTRAL EN EL LAGO DE CHAPALA, JALISCO

**T E S I S**  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA GEOFÍSICA  
P R E S E N T A :  
ALEJANDRA SELENE MEMBRILLO ABAD

ASESOR: DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA



México D. F., 2011.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
60-I-486

**SRITA. ALEJANDRA SELENE MEMBRILLO ABAD**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Rosa Ma. Prol Ledesma y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**ESTUDIO DEL CAMBIO ESTACIONAL DE LA RESPUESTA ESPECTRAL EN EL LAGO DE CHAPALA,  
JALISCO**

	RESUMEN
I	INTRODUCCIÓN
II	CONCEPTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA
III	ZONA DE ESTUDIO
IV	METODOLOGÍA
V	RESULTADOS
VI	DISCUSIÓN DE RESULTADOS
VII	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido 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 se 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, D. F. a 12 de Mayo de 2011

El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y SÁNCHEZ**

RJPYS\*EAT\*srs

## Agradecimiento

Agradezco a la DGAPA el financiamiento otorgado al proyecto IN113811, "Uso de percepción remota para evaluación de cambios en parámetros ambientales del Lago de Chapala", a través del PROGRAMA DE APOYO A PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (PAPIIT). El presente trabajo forma parte del citado proyecto.

*A Gloria, de quien aprendí que el amor es el motor que hace girar al mundo.*

*A Agustín, quien me enseñó a valorar el milagro de la naturaleza.*

*A los tres amores de mi vida, Renée, Naty y Regina.*

*A Doña Paz, mi abuelita, ejemplo de trabajo y sabiduría.*

*A María (q.e.p.d) que me amó como a nadie*

*...Aunque el frío queme,  
aunque el miedo muerda,  
aunque el sol se ponga y se calle el viento,  
aún hay fuego en tu alma,  
aún hay vida en tus sueños  
porque cada día es un comienzo nuevo...*

*M.B*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el tiempo invertido en la revisión de este trabajo, así como sus valiosos comentarios y aportaciones al mismo, al Ing. F. Alejandro Arroyo Carrasco, al M. en C. David Escobedo Zenil, al M. en C. Mauricio Nava Flores y al Dr. J. Antonio Hernández Espriú.

Agradezco a la M en C. Claudia Nava, Jefa de Proyecto de la Red Nacional de Monitoreo, al Dr. Jesús García Cabrera subgerente de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua y al Ing. Jesús Amezcua Cerda, Jefe de Proyecto de Calidad de Agua del Organismo Cuenca Lerma Santiago Pacífico de la CNA por la facilidad para proporcionarme información.

Al término de mi carrera y con la culminación de este trabajo agradezco con la plenitud de mi corazón a quién me formó, moldeó y encarriló en la vida profesional. Aún si sólo es el inicio de mi carrera, es el mejor inicio que jamás imaginé. Impulsada por una mujer única, brillante y extraordinaria como científica y con el mejor de los méritos: una extraordinaria calidad humana. Gracias Dra. Rosa María Prol Ledesma por compartirme su tiempo, su espacio, su corazón. Gracias al Dr. Marco A. Torres por compartirme sus conocimientos.

La historia de este trabajo no podría contarse sin la piedra angular de mi vida, mi familia. Debo mencionar mi orgullo por ser parte de la Familia Membrillo Abad porque poseo el privilegio de tener por Madre a una mujer que tiene el trofeo en dar amor. Gracias mamá por haberme regalado tu vida, por aguardar por mí cada vez que regrese a casa, porque sin ti no habría conocido el verdadero significado del amor. Por Padre poseo el privilegio de tener a un hombre con una fé y confianza inagotable porque el mundo sea cada vez mejor; gracias papá por los fines de semana que hicieron que me enamorara de la naturaleza a través de esos pequeños pero en realidad maravillosos viajes en familia que guardo con amor en mi vida. Y finalmente pero no menos importante tengo el privilegio de ser hermana de la mejor enfermera del mundo y del mejor licenciado en diseño de la comunicación gráfica. Gracias Claudia y Agustín porque han perdonado mis mayores defectos por el simple hecho de que me aman.

Gracias a mis abuelos, Agustín “peque”, Paz y María (q.e.p.d). Gracias a mis tíos y primos. Gracias a Renée, Naty, Regina por ser luz en mi vida. Gracias Eliza por la única juerga de mi vida (sic).

Agradezco también el milagro que la vida y Dios me han regalado, de encontrar en mi camino a mis más extraordinarios amigos y amigas.

A Lety, por estar conmigo en todo momento.

A Alejandra Fernández por tu apoyo incondicional, sin ti no lo habría logrado.

A Pris y Yane porque juntas recorrimos las aulas de la gloriosa facultad de ingeniería.

A Isaac porque eres mi mejor amigo.

A Jorge por adoptarme en los inicios de esta aventura.



A Alejandro por tu confianza

A Viry quien merece toda mi admiración y agradecimiento

A Dra Ruth Villanueva por ser ejemplo de bondad.

A mis compañeros del Instituto de Geofísica por su inmejorable compañía, Jazmin, Bere, Sandy, Dayan, Astrid, Anita, Marianita, y a todos mis compañeros gracias.

A René por tu tiempo y tus grandes sacrificios.

Mi cariño y agradecimiento a la Fam. Pérez Frausto en especial a "lupita". Gracias tía por las agradables tardes de charla y por creer en mí. A Mary, Vane y Pepe por su cariño.

A Simón, Nicoletta, Erina, Merino, Antonella y Donato por tenerme presente en sus pensamientos.

A Beatriz Romero y Edgar Contreras A. porque sin su apoyo en el trabajo no habría podido financiar mis estudios. Y por ser unos excelentes amigos.

A Mau, Tia Mar y Nancy por las porras.

A Enki, Meli y Nora por su cariño.

Al Ing. Ricardo Castejón, Ing. E. Amador, Ing. D. Escobedo, Ing. Alejandro García y a la Ing. Thalía Pimentel por el apoyo en los trámites académicos.

A mis profesores Verónica García C., Ing. Alejandro Jaramillo. Dr. Carlos Garza, Ing. R. Castejón, Dr. Tomás González M. y por supuesto a la Dra. Rosa Ma. Prol, quienes dieron fortaleza a mi vida académica y personal.

A todos ... gracias!

# INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>IV</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	3
2. PERCEPCIÓN REMOTA.....	4
2.1 DEFINICIÓN: .....	4
2.2 FUENTES DE ENERGÍA Y PRINCIPIOS DE RADIACIÓN.....	5
2.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....	5
2.4 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	8
2.4.1 INTERACCION DE LA RADIACIÓN CON LA ATMÓSFERA .....	9
2.4.2 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA SUPERFICIE .....	11
2.4.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA VEGETACIÓN .....	11
2.4.4 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON EL AGUA.....	14
2.5. SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA.....	15
2.6. ADQUISIÓN DE DATOS.....	18
2.7. ÓRBITAS DE LOS SATÉLITES.....	19
2.8. VARIABLES DETECTADAS POR LA PERCEPCIÓN REMOTA.....	19
2.9. RESOLUCIÓN DE INSTRUMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA.....	19
2.10 PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES:.....	20
2.10.1 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA: .....	20
2.10.1.1 CORRECCIÓN DEL ERROR DEL SENSOR DEL SISTEMA .....	21
2.10.1.2 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA ABSOLUTA DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA .....	23
CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA RELATIVA DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA .....	25
2.10.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA:.....	25

2.11 DESCRIPCIÓN DE DATOS.....	26
3. ZONA DE ESTUDIO.....	29
3.1 LOCALIZACIÓN.....	29
CLIMA.....	30
GEOLOGIA GENERAL DEL OESTE DE MEXICO .....	30
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL LAGO DE CHAPALA .....	32
3.4.1 PROPIEDADES FÍSICAS.....	32
3.4.2 SEDIMENTOS EN EL LAGO DE CHAPALA.....	32
3.5 FACTORES QUE MODIFICAN LA RESPUESTA ESPECTRAL DEL LAGO DE CHAPALA.....	32
3.6 DATOS GEOCIENTÍFICOS DISPONIBLES.....	33
4. METODOLOGÍA .....	35
4.1 PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES. ....	36
4.1.1 CÁLCULO ESTADÍSTICO UNIVARIADO DE LOS DATOS CRUDOS.....	36
4.1.2 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA .....	36
4.1.3 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA. ....	38
4.2 REALCE ESPECTRAL.....	38
4.2.2 COCIENTE DE BANDAS.....	38
4.2.3 METODO DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) .....	40
4.2.4 COMPOSICIÓN A COLOR.....	41
4.2.5 MÉTODO DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES .....	42
4.2.5.1 NUEVA EXPRESION DE LOS DATOS .....	43
4.2.5.2 MATRIZ DE CORRELACIÓN .....	43
4.2.6 TÉCNICA DE CROSTA O ANÁLISIS DE COMPONENTES ORIENTADAS (ACPO) .....	43
4.3 REALCE ESPACIAL .....	44
4.3.1 REALCE DE EJES Y BORDES EN EL DOMINIO ESPACIAL.....	44
4.3.1.1 REALCE DE EJES O BORDES LINEALES.....	44

4.3.2 DELIMITACIÓN DE CUERPOS DE AGUA .....	45
4.4 EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TEMÁTICA .....	46
4.4.1 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	46
4.4.2    MÉTODOS ESPECÍFICOS PARA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA .....	46
4.4.2.1 CLASIFICACIÓN DE PARALELEPÍPEDO .....	46
4.4.2.2    CLASIFICACIÓN DE MÍNIMA DISTANCIA .....	47
4.4.2.3    CLASIFICACIÓN DE MÁXIMA PROBABILIDAD.....	47
5. RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DEL LAGO DE CHAPALA .....	49
5.1 CÁLCULO ESTADÍSTICO UNIVARIADO DE LOS DATOS CRUDOS .....	49
5.2 REALCE ESPECTRAL.....	51
5.2.1    COCIENTES DE BANDAS.....	53
5.2.2    INDICE DE VEGETACION DIFERENCIAL NORMALIZADO (NDVI) .....	56
5.2.3    COMPOSICION A COLOR .....	58
5.2.4 TÉCNICA DE COSTA O ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ORIENTADAS (ACPO) .....	59
5.3 REALCE ESPACIAL .....	63
5.3.1 DELIMITACIÓN DE CUERPOS DE AGUA.....	63
5.4 CLASIFICACION SUPERVISADA. ....	67
5.5 ESTUDIO DE CAMBIO DE LOS MATERIALES IDENTIFICADOS EN EL LAGO DE        CHAPALA DE MAYO A NOVIEMBRE 2002. ....	71
5.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE NDVI CON $P_{TOT}$ .....	73
6. DISCUSION DE RESULTADOS.....	76
7. CONCLUSIONES.....	81
8. LINEA DE INVESTIGACIÓN A SEGUIR .....	83
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	84
9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	85

## RESUMEN

El lago de Chapala es el lago más grande de México y por ende un importante abastecedor de agua dulce. Se encuentra localizado en dos estados, siendo Jalisco el que alberga un 84% del área total mientras que el 14% se encuentra en el estado de Michoacán. Este cuerpo de agua tiene una gran importancia a nivel nacional en materia hídrica, ecológica y social, por lo que se han impulsado medidas que garanticen su sustentabilidad, como el monitoreo y verificación de calidad del agua, manejo y conservación de cuerpos de agua, acciones de saneamiento de descargas de aguas residuales municipales e industriales, etc.

El presente estudio utiliza la técnica de Percepción Remota para identificar y mapear materiales como pigmentos de clorofila, sedimentos suspendidos y zonas de agua espectralmente limpia con el objeto de identificar los materiales que caracterizan la respuesta espectral en el lago de Chapala. Asimismo proporciona mapas temáticos que permiten observar la distribución espacial y temporal de los materiales identificados y que con base en la literatura son comunes en el lago de Chapala.

Se utilizó el programa IDRISI, creado por la Universidad de Clarke para aplicar diversas metodologías a imágenes del sensor ETM+ de la plataforma Landsat. El estudio se llevó a cabo en dos fechas de diferente temporada estacional del año 2002.

La principal variación temporal observada fue la de sedimentos suspendidos, ya que el área cubierta por sedimentos suspendidos en mayo es de 688.4 km<sup>2</sup> mientras que para noviembre, tras la temporada de lluvias el área que ocupa este material es de tan sólo 57.7 km<sup>2</sup>. Las cantidades se invierten para aguas con baja turbidez ya que en mayo este material apenas cubre un área de 121.3km<sup>2</sup>, y en noviembre ocupa la mayor área, 721.2 km<sup>2</sup>. Los pigmentos de clorofila cubrieron áreas de entre 36.7 y 69.9 km<sup>2</sup> en mayo y noviembre respectivamente. Las áreas cubiertas de pigmentos de clorofila se localizan principalmente al este del lago.

Esta información espacial es útil para monitorear la calidad y cantidad del agua de manera simultánea lo que resulta importante dada la variabilidad que presenta diariamente, principalmente debido a las dinámicas eólicas del área de estudio.

# 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el tema sobre disponibilidad de agua como un recurso indispensable para la vida es fundamental en la administración política y social de todo país. Algunos ambientalistas reconocen que en un futuro no muy lejano las guerras serán por el agua, es por ello que científicos, ambientalistas e hidrólogos se han dado a la tarea de realizar estudios sobre la distribución y manejo del recurso. (De Anda, J. & Maniak, U., 2007, Sandoval, 1994) En la actualidad los estudios sobre el agua se han encaminado principalmente hacia el estudio del agua como un bien socio-cultural del cual se busca un desarrollo sustentable.

El lago de Chapala es el más grande de México y por lo tanto un importante reservorio de agua dulce superficial. Se le considera como uno de los lagos más someros del mundo. Es un lago semi-tropical y abastece más del 50% de agua a la ciudad de Guadalajara para consumo humano (CNA, 2009).

Los principales aportes de agua al lago son a través del río Lerma y los escurrimientos pluviales, en tanto sus salidas son por el suministro de agua para consumo humano, la evaporación y sólo cuando alcanza la cota máxima de almacenamiento tiene salida hacia el río Santiago (Aparicio, 2001).

La cuenca que incluye al lago de Chapala es la cuenca Lerma-Chapala, la cual se considera decisiva en el desarrollo socio-económico del país. Las consecuencias de este desarrollo se han visto reflejadas en el desbalance hídrico del Lago de Chapala, que pone en riesgo la propia supervivencia del lago. Uno de los principales problemas que enfrenta el lago, es la degradación química y biológica que se manifiesta por la vegetación acuática (De Anda *et al.*, 1998).

El conocimiento de los ciclos (biológico e hidrológico) que controlan el ecosistema acuático del lago de Chapala, permiten tomar decisiones dentro de los programas de administración, desarrollo y sustentabilidad. Dada la importancia de los estudios sobre las funciones de estos sistemas y de su biodiversidad, en el presente trabajo se realizó un estudio de identificación espectral de los principales materiales que se encuentran en el lago, que eventualmente proporcionarán información sobre los cambios en la biodiversidad.

Una de las consecuencias de las perturbaciones en el ecosistema acuático del lago es el cambio en la producción primaria del fitoplancton (biomasa), ya que es la fuente de energía en la cadena alimenticia de la mayoría de los ecosistemas acuáticos. La producción primaria depende de la disponibilidad de nutrientes (fósforo y nitrógeno) y a la atenuación de la luz como consecuencia de la turbidez (Lind, O., & Dávalos-Lind, 2001). Una de las principales fuentes de enriquecimientos de nutrientes es la descarga de aguas residuales propias de actividades agrícolas, industriales y desechos domésticos de las poblaciones que se asientan en torno del lago y a lo largo de la cuenca Lerma-Chapala, ya que tiene altos contenidos de materia orgánica y que al no contar con un tratamiento adecuado como lo establece la NOM-001-SEMARNAT-1996, han provocado la eutrofización cultural de este importante cuerpo de agua.

El lago llega a ser menos turbio durante la temporada de lluvias debido al aumento de la profundidad y disminución de resuspensión de sedimentos. La resuspensión está en función, de la dirección y velocidad del viento (los vientos predominantes son de Este a Oeste) y de la naturaleza de los sedimentos en el lago.

Las partículas arcillosas juegan un doble papel en el ecosistema; por un lado limitan la producción primaria debido a la reducción de luz, y por otro facilitan al crecimiento del bacterioplancton debido a la concentración de materia orgánica disuelta, por lo que el número de bacterias aumenta cuando aumenta la turbidez. En consecuencia la biomasa es significativamente mayor en las regiones más turbias del agua. La reproducción de organismos indeseables como el lirio acuático o las cianófitas (Hunter *et al.* 2011) causan el deterioro del ambiente.

Dadas las dimensiones del cuerpo de agua en estudio y de su gran variabilidad temporal (Filonov *et al.*, 2001), se propone el uso de la técnica de percepción remota que permite obtener información de grandes áreas para estudios temporales y espaciales. La aplicación de diferentes metodologías de percepción remota permite identificar materiales como pigmentos de clorofila (biomasa), sedimentos en suspensión y agua espectralmente limpia. Metodologías tales como: cocientes de bandas espectrales (álgebra de bandas), análisis de componentes principales, técnica de Crosta, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y composición a color, fueron utilizadas para la extracción de información espacio-temporal del lago. La identificación de materiales se basa en la respuesta espectral de la vegetación acuática, que puede ser detectada como pigmentos de clorofila, de la respuesta espectral de un cuerpo de agua limpio así como de materiales suspendidos. Estos materiales suspendidos, al encontrarse en grandes cantidades,

pueden proporcionar información que indiquen parcialmente su procedencia, es decir, si provienen de materiales arcillosos o de materiales con contenidos de hierro.

La percepción remota a través del procesamiento de imágenes satelitales como las imágenes Landsat proporciona información sobre la calidad de agua que han resultado ser parte de grandes estrategias de monitoreo en cuerpos de agua en todo el mundo ( Dekker & Peters 1993; Hunter *et al.* 2011).

El alcance de este estudio es desplegar información espacial que muestre la distribución de los diferentes materiales identificados así como un análisis cualitativo de la comparación del mapa temático resultante y datos de muestreos *in situ* proporcionados por el organismo de cuenca Lerma-Santiago-Pacífico.

#### 1.1 OBJETIVOS

- Identificación de materiales que dominan la respuesta espectral en el Lago de Chapala
- Análisis de cambio de los materiales que dominan la respuesta espectral de Lago de Chapala

#### 1.2 JUSTIFICACIÓN

Una de las estrategias que se han propuesto para lograr la preservación de la cantidad y calidad del agua es el monitoreo de la calidad del agua (IMTA, 2009).

Las técnicas más utilizadas son muestreos *in situ*, de donde se obtienen parámetros que determinan la calidad del agua como la turbidez, sedimentos suspendidos, visibilidad (disco de Secchi) y concentración de clorofila entre otros. Estos parámetros pueden predecirse a partir de datos obtenidos de sensores satelitales una vez que se han identificado (Alle & Johnson, 1999; Dekker & Peters, 1993; Harrington *et al.*, 1992). A diferencia de los muestreos *in situ* la percepción remota proporciona información espacial simultánea.



## 2. PERCEPCIÓN REMOTA.

### 2.1 DEFINICIÓN:

La percepción remota de la Tierra se define como el uso de la radiación electromagnética para adquirir información sobre el océano, tierra y atmósfera sin estar en contacto físico con el objeto, superficie o fenómeno en estudio. Las medidas obtenidas por percepción remota son indirectas y de áreas amplias. (Martin, 2006)

La fotografía aérea es la forma original de percepción remota, jugó un importante papel en el descubrimiento de depósitos minerales y petróleo alrededor del mundo. Estos éxitos usando la región del visible del espectro electromagnético sugirieron la posibilidad de obtener buenos resultados usando otras longitudes de onda incluyendo el infrarrojo térmico y microondas. El desarrollo y despliegue de satélites artificiales para el estudio de la superficie del Tierra, comenzó en 1960 y proporcionó un lugar ventajoso para la adquisición de imágenes de la superficie de la Tierra (Sabins, 1987).

Los procesos generalizados y elementos que se involucran en la percepción remota electromagnética de recursos de la Tierra son (ver Figura 2.1):

- a) Propagación de la energía a través de la atmósfera
- b) Interacciones de energía con las características de la superficie de la Tierra.
- c) Retransmisión de la energía a través de la atmósfera
- d) Sensores aéreos y espaciales
- e) Datos de sensor en forma digital e impresa
- f) Uso de sensores para registrar variaciones de la forma en que las características superficiales de la Tierra reflejan y emiten energía electromagnética.
- g) Procesamiento de datos que incluye la examinación de datos usando dispositivos de interpretación de los datos obtenidos de los sensores.
- h) Compilación e integración de datos en sistemas de información geográfica.
- i) Toma de decisiones por parte de usuarios finales.

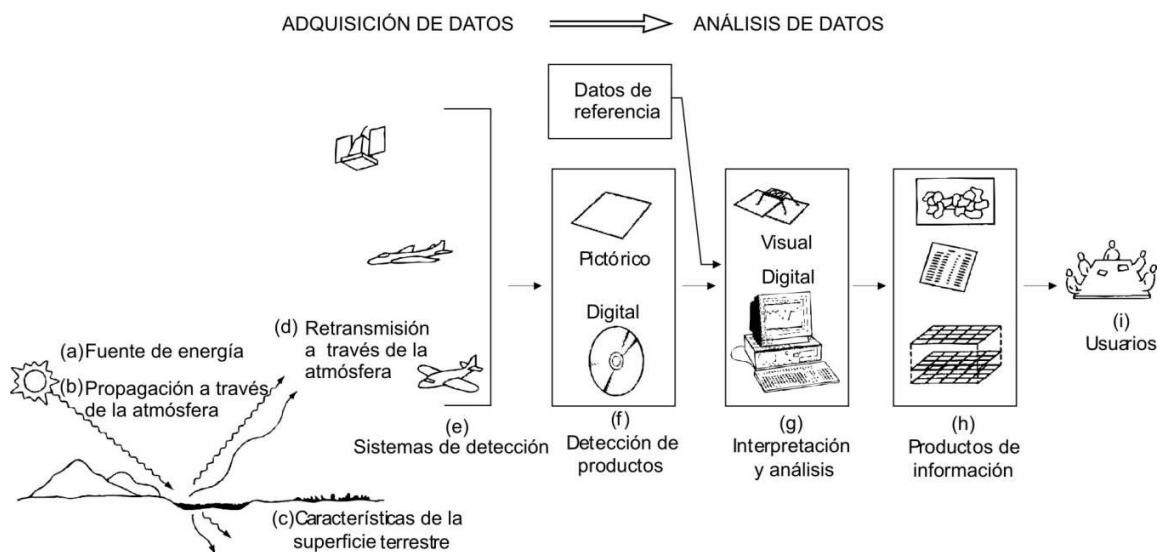


Figura 2.1. Percepción remota electromagnética de recursos de la Tierra (Modificada de Lillesand et al., 2008).

## 2.2 FUENTES DE ENERGÍA Y PRINCIPIOS DE RADIACIÓN.

El sol es la fuente de radiación electromagnética para la percepción remota. Todos los objetos continuamente emiten radiación electromagnética excepto los objetos en cero absoluto. Los objetos también reflejan radiación que ha sido emitida por otros objetos. Las cantidades geofísicas de interés obtenidas de los sensores remotos son inferidas de las propiedades de radiación electromagnética reflejada o emitida, a partir de la distribución de intensidad y frecuencia de esta radiación captada en un sensor. Esta radiación tiene 3 principales fuentes: radiación de cuerpo negro emitida desde la superficie, radiación solar reflejada y la energía retrodispersa de energía de pulsos dirigida transmitida por radares satelitales (Martin, 2006).

## 2.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La radiación electromagnética consiste en un campo eléctrico (E) que varía en magnitud en dirección perpendicular a la dirección de propagación. Además un campo magnético (H) orientado perpendicularmente al campo eléctrico se propaga en fase con el campo eléctrico.

La energía electromagnética (ver Figura 2.2) muestra tres propiedades:

- *Longitud de onda* ( $\lambda$ ) es la distancia de una cresta de onda a la siguiente, puede ser medida en cualquier unidad de longitud.

- La *frecuencia* es medida como el número de crestas que pasan por un punto fijo en un periodo dado de tiempo. Es a menudo medida en Hertz, unidad que equivale a un ciclo por segundo
- *Amplitud* es equivalente a la altura de cada pico y se mide comúnmente como niveles de energía expresada como Watt por metro cuadrado por micrómetro

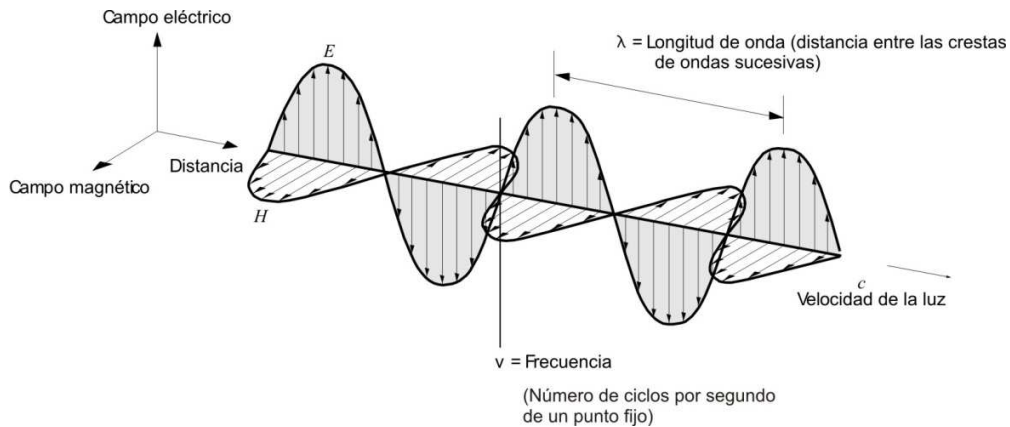


Figura 2.2 Componente eléctrica (E) y magnética (H) de la radiación electromagnética. Las componentes eléctrica y magnética están orientadas en ángulo recto una con respecto de otra y varía a lo largo de un eje perpendicular al eje de propagación (Tomada de Campbell, 2002).

La velocidad de la energía electromagnética (c) es constante a 299,893 Km/s. La longitud de onda y frecuencia (ν) están relacionadas:

$$c = \lambda \nu \dots 1$$

Por tanto las características de la energía electromagnética pueden ser especificadas usando tanto la frecuencia como la longitud de onda (Campbell, 2002). En percepción remota es común clasificar las ondas electromagnéticas por su ubicación en función de su longitud de onda dentro del espectro electromagnético (Figura 2.3). La unidad más usada para medir la longitud de onda a lo largo del espectro es el micrómetro (μm) (Sabins, 1987).

Aunque generalmente se asignan nombres a las regiones del espectro electromagnético por conveniencia, en realidad no hay una clara línea que divida entre una región y la otra. Esta división se ha creado a partir de varios métodos para detectar cada tipo de radiación más que de las diferencias inherentes a las características de energía de las diferentes longitudes de onda. El espectro óptico de 0.30 a 15 μm definen las longitudes de onda que pueden ser reflejadas y refractadas con lentes y espejos. El espectro de reflexión que se extiende desde 0.38 a 3.0μm,

definen la porción del espectro solar usado directamente por percepción remota. (Campbell, 2002)

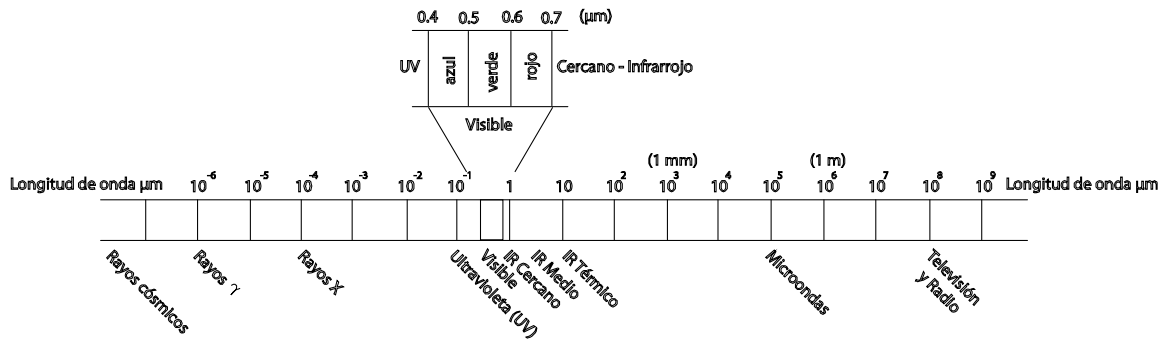


Figura 2.3. Espectro electromagnético (Tomada de Lillesand, & Kiefer, 2008,).

La porción del espectro visible es muy pequeña ya que la sensibilidad del ojo humano se extiende solo desde alrededor de  $0.4 \mu\text{m}$  hasta aproximadamente  $0.7 \mu\text{m}$ . Consta de los segmentos primario aditivo comprendido entre  $0.4\text{-}0.5\mu\text{m}$  (azul),  $0.5 - 0.6\mu\text{m}$  (verde) y  $0.6\text{-}0.7 \mu\text{m}$  (rojo). Los colores primarios están definidos de tal manera que ningún color primario puede formarse de la mezcla de otros dos y todos los demás colores pueden ser formados mezclando los tres primarios en proporciones adecuadas. Igual proporción de los primarios aditivos combinados forman la luz blanca.

El color de un objeto está definido por el color de la luz que refleja, La combinación de los tres primarios sustractivos definen los colores de los pigmentos y colorantes; cada uno de los tres sustractivos primarios absorben un tercero del espectro visible, el amarillo absorbe la luz azul y refleja el rojo y verde; el cian absorbe la luz roja y refleja la luz azul y verde; y magenta absorbe la luz verde y refleja la luz roja y azul. Una mezcla en iguales proporciones de pigmentos de los tres primarios sustractivos proporciona el negro. La energía ultravioleta (UV) colinda con el azul de la porción del visible del espectro electromagnético. Contiguo al final del rojo de la región del visible están tres diferentes categorías de ondas del infrarrojo (IR): IR cercano ( $0.7\text{-}1.3\mu\text{m}$ ), IR medio ( $1.3\text{-}3\mu\text{m}$ ) e IR térmico (más allá de  $3.0\text{-}14 \mu\text{m}$ ) y con longitud de onda de  $1\text{mm}\text{-}1\text{m}$  se encuentra la porción de microondas del espectro electromagnético.

Aunque varias características de la radiación electromagnética son más fáciles de describir con la teoría ondulatoria, otras teorías ofrecen una mejor comprensión de cómo interactúa la energía

electromagnética con la materia. La teoría de la partícula que sugiere que la radiación electromagnética está compuesta de muchas unidades discretas llamadas fotones o cuantos.

## 2.4 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

### LEYES DE LA RADIACIÓN

La propagación de la energía electromagnética sigue ciertas leyes físicas. Las leyes de interés del presente estudio se enlistan a continuación.

Planck descubre que la energía electromagnética es absorbida y emitida en unidades discretas llamadas fotones. Planck define una constante  $h$  para relacionar la frecuencia ( $\nu$ ) con la energía radiante (Q):

$$Q = h\nu \quad \dots 2$$

Este modelo explica el *efecto fotoeléctrico*, la generación de corrientes eléctricas por exposición de ciertas sustancias a la luz, como el efecto del impacto de unidades discretas de energía sobre superficies de ciertos metales, causando la emisión de fotones. La cantidad de energía y la longitud de onda que un cuerpo emite dependen de la temperatura de este.

La *ley de Kirchhoff*, establece que la relación entre la radiación emitida y el flujo de radiación absorbido es el mismo para todos los cuerpos negros a la misma temperatura. Un cuerpo que absorbe intensamente radiación en una longitud de onda emite intensamente en esa misma longitud de onda.

*Ley de Stefan-Boltzmann* define la relación entre la radiación total emitida  $W$  y la temperatura  $T$  (temperatura absoluta en K)

$$W = \sigma T^4 \quad \dots 3$$

donde  $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Establece que un cuerpo negro caliente emite más energía por unidad de área que un cuerpo frío.

*Ley de desplazamiento de Wien* especifica la relación entre la longitud de onda de la radiación emitida y la temperatura de un cuerpo negro.

$$\lambda = 2897.8/T \quad \dots 4$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación máxima y T es la temperatura absoluta (K). Para cuerpos negros calientes, la emisión de radiación máxima ocurre en longitud de onda corta.

#### 2.4.1 INTERACCION DE LA RADIACIÓN CON LA ATMÓSFERA

Toda radiación útil en la percepción remota pasa a través de la atmósfera terrestre y está sujeta a varias modificaciones debido a procesos físicos como:

*Dispersión*: es el cambio de dirección de la energía electromagnética por partículas suspendidas en la atmósfera o por moléculas largas de gases atmosféricos. La cantidad de dispersión depende del tamaño de las partículas, de su abundancia, de la longitud de onda de esta radiación y de la profundidad de la atmósfera que atraviesa. El comportamiento del fenómeno de dispersión se ilustra en la Figura 2.4

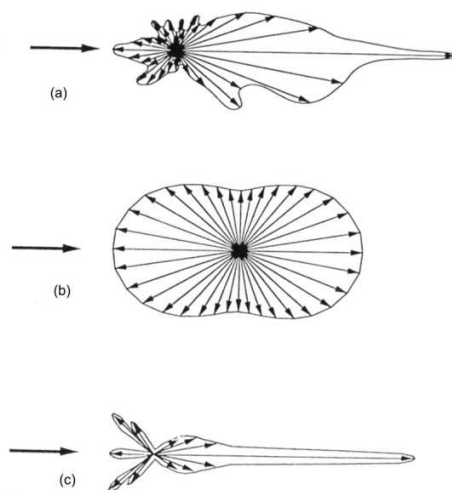


Figura 2.4. Comportamiento de la dispersión en tres clases de partículas atmosféricas. a) partículas atmosféricas de polvo y humo de forma irregular que crean un pico con gran dispersión hacia adelante. b) Moléculas atmosféricas muestran cierta simetría. c) Grandes gotas de agua crean un gran pico de dispersión hacia adelante (Tomado de Campbell, 2002)

Rayleigh demuestra que una atmósfera limpia está compuesta de gases atmosféricos que a su vez provocan la dispersión de la luz de una manera tal que la cantidad aumenta cuando la longitud de onda es más corta. La dispersión de Rayleigh ocurre cuando las partículas atmosféricas tienen diámetros pequeños con relación a la longitud de onda de la radiación, como pequeñas

partículas de polvo tales como nitrógeno  $N_2$  ( $1.4\text{\AA}$ ) y oxígeno  $O_2$ . Estas partículas tienen diámetros más pequeños que la longitud de onda del visible y el infrarrojo cercano. Pero la dispersión de Rayleigh puede ocurrir en ausencia de impurezas atmosféricas esto es, a veces referida como dispersión de atmósfera limpia. Este es el proceso dominante en la parte alta de la atmósfera 9-10 Km. La ley de Rayleigh establece que esta dispersión está en función de:

$$\frac{1}{\lambda^4} \quad \dots 5$$

*Dispersión Mie:* causada por partículas atmosféricas mas grandes incluyendo polvo, polen, humo y gotas de agua. Es dominante en la atmósfera de 0 - 5 Km donde las partículas de gran tamaño abundan.

*Dispersión no selectiva* es causada por partículas mucho mayores que las  $\lambda$  de la radiación dispersada. No depende de las longitudes de onda. Todas las longitudes del visible son dispersadas por igual (haz blanquecino o gris). Los sensores excluyen las longitudes de onda corta.

*Refracción:* es la flexión del rayo de luz en el área de contacto entre dos medios con diferentes índices de refracción.

$$n = \frac{c}{c_n} \quad \dots 6$$

$n$  es el índice de refracción

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío

$c_n$  es la velocidad de la luz en el medio.

Asumiendo un medio uniforme (aire), la luz que pasa por un medio más denso (por ejemplo: vidrio) es desviada hacia la normal de la superficie. El ángulo que forma el rayo de luz que entra al medio más denso, con respecto a la normal de la superficie es llamado ángulo  $\theta$ . El ángulo  $\theta'$  que define la trayectoria del rayo refractado esta dado por la *ley de Snell*, que se enuncia como sigue:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \dots 7$$

*Absorción:* La absorción de radiación ocurre cuando la atmósfera impide o atenúa fuertemente la transmisión de la radiación a través de la atmósfera. Tres gases son responsables de la mayor absorción de radiación solar: ozono, dióxido de carbono y vapor de agua (Campbell, 2002).

#### 2.4.2 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA SUPERFICIE

Reflexión: Ocurre cuando un rayo de luz es redireccionado al golpear en una superficie no transparente. Depende del tamaño de las irregularidades de la superficie.

*Reflexión especular:* redirecciona todo, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

*Reflexión difusa* ocurre cuando una superficie irregular o rugosa dispersa en todas direcciones (Campbell, 2002).

Algunos mecanismos de interacción de la radiación con la superficie de un cuerpo se muestran en la Figura 2.5.

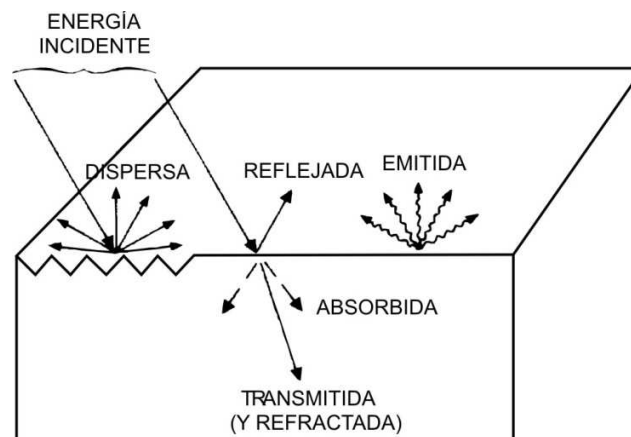


Figura 2.5. Mecanismos de interacción entre la energía electromagnética y la materia. (Modificado de Sabins, 1987)

#### 2.4.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA VEGETACIÓN

Dependiendo del clima y si los suelos proceden directamente del sustrato subyacente o si han sido transportados, la vegetación puede mostrar variaciones con relación a la geología. Las plantas usan energía solar para convertir el agua y dióxido de carbono en carbohidratos y oxígeno a través del proceso de fotosíntesis. La interacción de la radiación con la clorofila se da como una consecuencia de que ésta última está incluida en organismos vivos por lo cual su metabolismo es fuertemente dependiente de los sistemas vasculares basados en el agua y estructuras celulares. La abundancia de agua en su estructura por lo tanto también controla estas interacciones.

El catalizador de la fotosíntesis es el pigmento de clorofila, una compleja proteína que contiene hierro. La clorofila absorbe la radiación solar para aumentar el nivel de energía de los electrones e impulsar el bombeo de protones a través de las membranas celulares de la planta que es la base



para su metabolismo. Esto se logra por las bandas de absorción cerca de 0.45 y 0.68  $\mu\text{m}$ , en la parte azul y roja del espectro visible como se muestra en la Figura 2.6 (Drury, 2001). Es por eso que las hojas más sanas aparecen color verde.

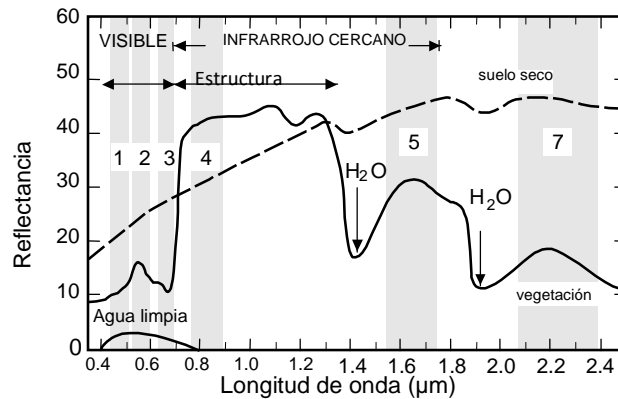


Figura 2.6. Típica curva de reflectancia espectral de una hoja, muestra el fuerte efecto de absorción por clorofila en la parte del visible del espectro, la eficiencia de reflexión de la longitud de onda del infrarrojo cercano (IRC) por sus células y la distintiva característica de absorción de contenido de agua en su estructura. Se muestra para comparación el espectro típico del suelo y agua limpia.

Además de las características de absorción, la clorofila puede estar hecha para emitir luz, o fluorescencia en dos estrechas bandas cercanas a 0.69 y 0.74  $\mu\text{m}$  si se iluminara con un haz fuerte de luz tal como un láser. La estructura de las células vegetales es tal que más del 50% de incidencia de la radiación del infrarrojo cercano se refleja internamente para emitirse nuevamente. El resto se transmite directamente a través de las hojas. El agua en las células absorbe algo de energía en sus características celulares alrededor de 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$ . La absorbancia está en función de la proporción del agua celular. Más allá de las 2.0  $\mu\text{m}$  las hojas absorben radiación del infrarrojo cercano, ver la Figura 2.6.

Las diferentes estructuras celulares, la proporción de clorofila y otros pigmentos, contenido de agua y morfología de la superficie de las diferentes plantas tiene un marcado efecto en sus propiedades espectrales desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano (VIS-IRC). La reflectancia espectral de la vegetación crece muy rápidamente a medida que aumenta la longitud de onda más allá de 0.7  $\mu\text{m}$  y 0.75  $\mu\text{m}$ . Este cambio brusco en la reflectancia espectral es también

conocido como el límite rojo o meseta del infrarrojo. La altura de la meseta del Infrarrojo cercano depende de la especie de planta responsable, pero la posición exacta de la meseta del IR puede variar también de acuerdo al tipo de planta. Figura 2.7. Estos dos factores pueden fluctuar dentro de una especie individual si las plantas están bajo estrés como resultado de escasez de agua o nutrientes o de una situación por exceso de elementos traza tóxicos tales como el cromo. Sin embargo las plantas son conjuntos de hojas, espacio y ramas con diferentes tamaños y formas de hojas. Todas las interacciones individuales en la estructura de tales compuestos pueden interferir y ampliar el rango de la respuesta espectral. Esto facilita la discriminación entre especies, salud y miembros enfermos de la misma especie.

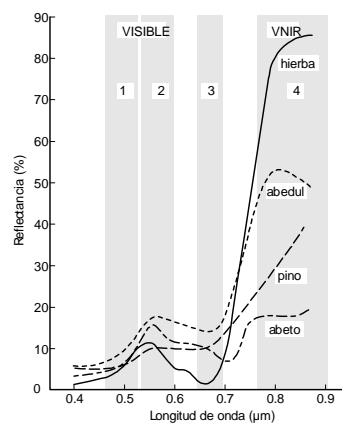


Figura 2.7 Rasgos espectrales de 4 tipos de vegetación con características similares en el visible pero fácilmente distinguibles en el infrarrojo cercano (VNIR por sus siglas en inglés). (Modificado de Drury, 2001)

Las plantas tienen ciclos de vida de duración variable, por lo tanto, sus propiedades espectrales no son fijas. Por ejemplo, una hoja caducifolia madura antes de caer, tiene un bajo contenido de clorofila lo que elimina la fuerte absorción roja, tal como se observa en la Figura 2.8. Durante estas variaciones en los ciclos de vida de las plantas, las células se encogen y secan, por lo que llegan a ser poco eficientes en la reflexión de radiación del infrarrojo cercano (IRC).

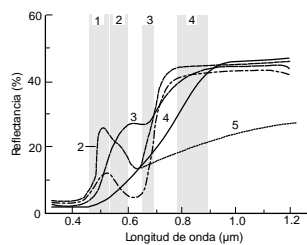


Figura 2.8. Los espectros 1 a 5 muestran las etapas progresivas del cambio de color de las hojas precedentes al Otoño, desde el verde-amarillo (2), rojo-naranja (3), marrón (4) y hojas secas (5). (Modificado de Drury, 2001)

#### 2.4.4 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON EL AGUA.

Los cuerpos de agua tienen una respuesta diferente a la radiación que la del agua ligada a las moléculas de los minerales. Estos no muestran las bandas de transición vibracionales discretas tan características del agua molecular. En lugar de las curvas de respuesta espectral muestran características generales. En el rango del visible las interacciones dependen de una variedad de factores. Solo considerando propiedades de reflectancia, la cantidad reflejada de luz visible de una superficie de agua depende del ángulo de iluminación y de la presencia y naturaleza de las ondas, las aguas tranquilas pueden mostrar destellos solares mientras que las aguas rizadas lo hacen con menos frecuencia. En general, menos del 5% de radiación visible incidente es reflejada por el agua.

El agua tiene una alta transmitancia para todas las longitudes de onda del visible pero aumenta a medida que la longitud de onda disminuye, como resultado, solo la luz azul penetra más allá de una cierta profundidad, las grandes longitudes de onda se han absorbido en niveles menos profundos. En agua limpia por lo tanto es posible estimar la profundidad de la intensidad de la radiación visible reflejada del fondo, particularmente de la luz azul. Para profundidades mayores que 40 m sin embargo toda la radiación visible es absorbida y los cuerpos de agua aparecen oscuros.

También hay una cierta cantidad de dispersión de luz en el agua, la cual es responsable del color azul del agua incluso si es demasiado profunda para ver el fondo. Hay dos factores que contribuyen a este efecto: La dispersión de Rayleigh asegura que las longitudes de onda corta se dispersan más que las más largas y la disminución en la transmitancia con el aumento de la longitud de onda asegura que la dispersión de la luz azul es improbable que se absorba antes de que escape a la superficie.

Sedimentos suspendidos, plancton y pigmentos naturales, todos aumentan la reflectancia de la luz visible del agua, por lo que es posible estimar la cantidad de material suspendido en el agua con datos de percepción remota.

En la región del infrarrojo cercano el agua actúa casi como un cuerpo negro perfecto y absorbe virtualmente toda la energía incidente. Este es el único material natural con esta propiedad y así los cuerpos de agua pueden ser fácilmente distinguibles de otras superficies características en esta parte del IR del espectro electromagnético. Incluso si son someros o contienen mucho material suspendido. Siendo una buena aproximación de un cuerpo negro, el agua es un emisor casi perfecto de radiación infrarroja así como es un buen absorbente Figura 2.9. Esto significa que las

medidas de radiación infrarroja emitida en la región de 8-14  $\mu\text{m}$  pueden ser usadas para calcular la temperatura de la superficie de cuerpo de agua exactamente.

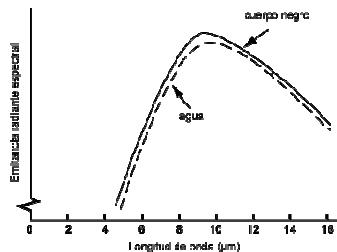


Figura 2.9. Medidas experimentales de la emisión radiante del agua revelan que es un cuerpo negro casi perfecto.

Una combinación de las propiedades del agua en masa y las de agua molecular controla la interacción de la energía radiante del agua retenida en los espacios de los poros de los suelos y rocas. El agua de los poros aumenta la absorbancia de la roca y suelos por lo que aparecen más oscuros que cuando están secos.

## 2.5. SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

De acuerdo a Sabins F. (1987), existen dos categorías principales de sistemas de percepción remota:

- *Sistema de marco*

Estos sistemas adquieren una imagen de un área o estructura en el terreno. Las cámaras vidicon son ejemplos comunes de tales sistemas. El ojo humano es considerado un sistema de estructura. Una cámara emplea un lente para formar una imagen de la escena en el plano focal, que es el plano en el que la imagen está bien definida. Un obturador se abre a intervalos seleccionados para permitir que la luz entre a la cámara, donde la imagen es registrada en una película fotográfica. Un vidicon es un tipo de cámara de televisión que registra la imagen en una superficie fotosensible cargada electrónicamente.

- *Sistema de barrido o escaneado*

El sistema de escaneado emplea un detector único con campos estrechos de visión que barre a través del terreno para producir una imagen. Cuando fotones de energía electromagnética radiada o reflejada desde el terreno son encontrados por el detector una señal eléctrica que se produce varía en proporción al número de fotones. La señal eléctrica es amplificada, registrada en una cinta magnética y reproducida posteriormente para producir una imagen. Todos los sistemas

de escaneo barren el campo visual del detector a través del terreno en una serie de líneas de escaneo paralelas. Los cuatro modos de escaneo más comunes son:

1. Sistema de barrido de trayectoria horizontal: Es el sistema más utilizado, emplea un espejo biselado que es rotado por motor eléctrico con un eje horizontal de rotación alineada paralelo con la dirección del vuelo. El espejo barre a través del terreno en un patrón de escaneo de líneas paralelas orientadas perpendicularmente a la dirección de vuelo, ver Figura 2.10. La energía radiada o reflejada desde el suelo es enfocada sobre el detector por espejos secundarios.

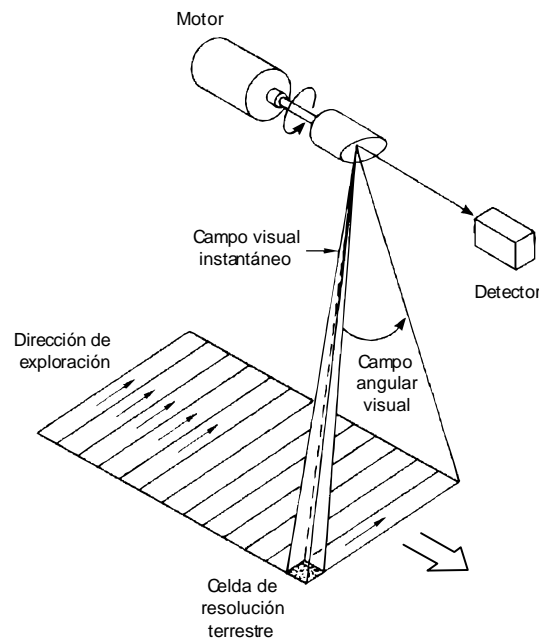


Figura 2.10 Sistema de barrido de trayectoria horizontal

2. Sistema de barrido circular, en este tipo de sistema el motor de escaneo y el espejo son montados con un eje vertical de rotación que barre en trayectoria circular el terreno como se observa en la Figura 2.11. Solo la parte delantera del barrido se registra para obtener imágenes. Una ventaja de este sistema es que la distancia entre escáner y terreno es constante y todas las celdas de resolución de suelo tienen la misma dimensión. La principal desventaja es que la mayoría de las imágenes y sistemas de despliegue son diseñados para datos de escaneo lineal por lo que los datos de escaneo circular deben ser reformateados antes del procesamiento. Los sistemas de escaneo

circular se usan para reconocimiento de propósitos en helicópteros y aeronaves de bajo vuelo.

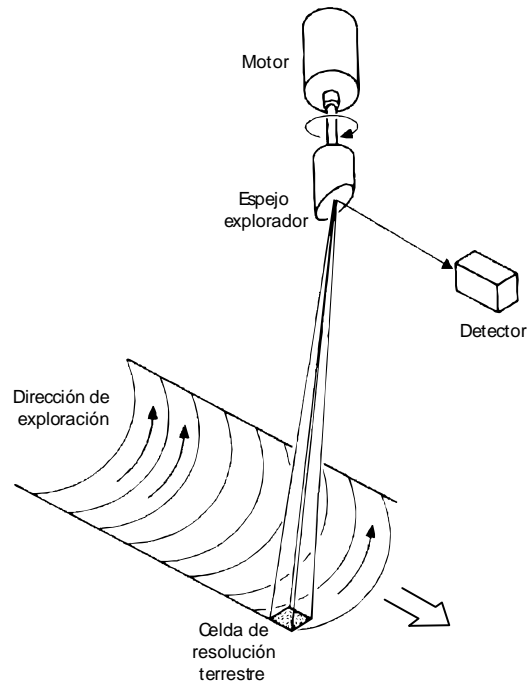


Figura 2.11 Sistema de barrido circular

3. Sistemas de barrido a lo largo de la trayectoria: Con este sistema se logra una alta resolución espacial y espectral. El eje se ubica a lo largo de un arreglo lineal orientado en forma normal a la trayectoria del vuelo y el IFOV (instantaneous fields of view)<sup>1</sup> Ver Figura 2.12

---

<sup>1</sup> IFOV es el ángulo sólido a través del cual un detector es sensitivo a la radiación.

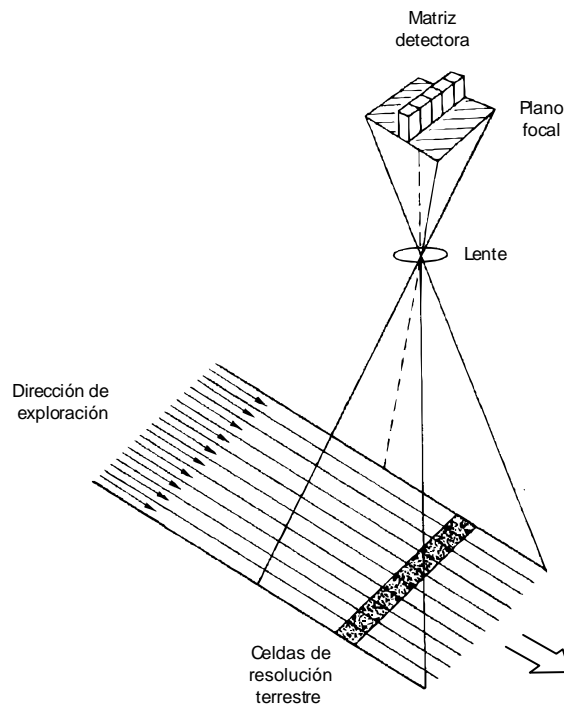


Figura 2.12 Sistemas de barrido a lo largo de la trayectoria

## 2.6. ADQUISIÓN DE DATOS

Los sistemas de percepción remota colectan datos análogos (fotos aéreas) y/o digitales (matriz de valores de brillo, obtenida a partir del uso de escáner)

Una imagen puede estar representada por pequeños cuadros de igual tamaño y forma: pixel (picture element). El brillo de cada pixel está representado por un valor numérico DN.

Los datos de percepción remota están colectados usando sistemas de percepción remota pasivos o activos. Se requiere de dispositivos que registren la energía electromagnética. Existen dos tipos de sensores. Los sensores pasivos (fuente de radiación externa) o activos (generan fuente de radiación), instalados en plataformas colocadas a cierta distancia del objeto de estudio. Estas plataformas pueden estar situadas en un avión o en el exterior de la atmósfera terrestre como en un satélite.

## 2.7. ÓRBITAS DE LOS SATÉLITES

Los principales tipos de orbitas de observación de la Tierra:

- Geoestacionaria: es aquella en la que el satélite siempre está en la misma posición con respecto a la Tierra
- Orbitas sincronizadas con el sol
- Orbitas inclinadas: Tienen una inclinación entre 0° y 90° estos satélites no están sincronizados con el sol y, por tanto, ven cada lugar de la tierra a diferentes horas

## 2.8. VARIABLES DETECTADAS POR LA PERCEPCIÓN REMOTA

Variables que se pueden medir directamente, lo que significa que los datos obtenidos pueden proveer información fundamental biológica y/o física, sin necesidad de contar con datos *in situ*. (Por ejemplo, mapeo de temperaturas)

Variables híbridas creadas analizando sistemáticamente más de una variable biofísica. (Modelo para detectar daños en la vegetación a partir de contenido de clorofila, temperatura, contenido de humedad)

## 2.9. RESOLUCIÓN DE INSTRUMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

La resolución es la medida de la capacidad de un sistema óptico para distinguir entre señales que están espacialmente cerca o espectralmente similar. Se enlistan a continuación los diferentes tipos de resolución:

- Resolución espectral. Número y ancho de los intervalos de longitud de onda en el espectro electromagnético para el cual el sensor es sensible.
- Resolución espacial: Medida de menor separación angular o lineal entre dos objetos que pueden ser resueltas por el sensor
- Resolución temporal: Es la frecuencia de obtención de imágenes
- Resolución radiométrica: Numero de niveles digitales para expresar los datos recogidos



## 2.10 PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES:

El Pre-procesamiento se refiere a las operaciones que son preliminares para el análisis principal, esto es, la restauración de la imagen, que involucra la corrección de distorsión, degradación y ruido introducido durante el proceso de imagen. La restauración de la imagen produce una imagen corregida tan cercana como es posible, tanto geométrica como radiométricamente, a las características de la energía radiante de la escena original. Para corregir los datos de percepción remota se deben determinar errores internos y externos. Los errores internos son creados por el mismo sensor, mientras que los errores externos son debidos a las perturbaciones de la plataforma y la modulación de la atmósfera y las características de la escena que son variables en la naturaleza (Jensen, 1996).

### 2.10.1 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA:

Las señales de radiación electromagnética colectadas por satélites están modificadas por dispersión y absorción por gases y aerosoles mientras viajan a través de la atmósfera de la superficie de la Tierra al sensor. La absorción gaseosa así como la dispersión gaseosa o dispersión de Rayleigh pueden ser caracterizadas mientras que la absorción por aerosoles dificulta la caracterización debido a su variación en tiempo y espacio, estos son causa de grandes limitaciones para la normalización radiométrica de datos satelitales (Song, *et al.*, 2001).

Las primeras operaciones que se realizan son los procedimientos basados en esfuerzos para modelar el comportamiento físico de la radiación a medida que pasa por la atmósfera. La aplicación de estos modelos permite observar reflectancias para aproximarse a los valores verdaderos que puedan ser observados bajo una atmósfera limpia, mejorando así la calidad de la imagen y el análisis de la precisión.

Los modelos físicos tienen ventajas importantes con respecto a la precisión y aplicabilidad para una gran variedad de circunstancias. Pero esto también tiene significativas desventajas. A menudo esto es muy complejo, usualmente requiere de programas de cómputo complicados. Una limitación más importante es el requerimiento de información meteorológica detallada correspondiente a la humedad atmosférica y las concentraciones de partículas atmosféricas. Tales datos pueden ser difíciles de obtener con el detalle necesario y puede aplicarse a pocos puntos dentro de la escena Landsat. También las condiciones atmosféricas varían con la altitud y los datos de radiosondeo que representan cambios con la altitud son rutinariamente colectados solo en

pocas localizaciones, aunque la disponibilidad de la colección de datos por satélites meteorológicos ofrece la posibilidad para aumentar el uso de tales métodos (Campbell, 2002)

El pre-procesamiento radiométrico influye en los valores de brillo de una imagen para corregir por malfuncionamiento del sensor o para ajustar los valores para compensar por degradación atmosférica. Cualquier sensor que observe la superficie de la tierra que use visible o visible cercano puede registrar una mezcla de dos tipos de brillo. Un brillo es debido a la reflectancia de la superficie de la tierra, (brillo que es de interés para la percepción remota, sin embargo también observa los brillos de la atmósfera), y el otro brillo que es debido a los efectos de dispersión. Por lo tanto, un valor digital observado de brillo puede ser en parte el resultado de la reflectancia de la superficie y en parte el resultado de la dispersión de la atmósfera. Nosotros no podemos distinguir inmediatamente entre los dos brillos pero un objetivo de la corrección atmosférica está enfocado en identificar y separar estas dos componentes. Idealmente la corrección atmosférica podría encontrar una corrección separada para cada píxel en cada escena; en la práctica, podemos aplicar la misma corrección para una banda entera o aplicar un factor individual para una región local dentro de la imagen. (Campbell, 2002)

#### 2.10.1.1 CORRECCIÓN DEL ERROR DEL SENSOR DEL SISTEMA

En ocasiones el sistema de percepción remota no funciona apropiadamente, resultando en errores radiométricos en los datos. Algunos de los errores radiométricos más comunes son: pérdida de línea, bandeamiento y problemas de inicio de línea. El sistema de escaneo Landsat Thematic Mapper genera un único tipo de ruido de línea de escaneo, el cual puede estar en función de:

Ganancia relativa y/o diferencias de compensación entre los 16 detectores dentro de una banda (causando creación de bandas) y/o Variación entre vecinos hacia adelante (W-E ) y a la inversa (E-W) escaneo de los 16 detectores, causando bandeamiento. Existen métodos de filtrado para remoción de ruido de la línea de escaneo de las imágenes Landsat TM. Sin embargo el procedimiento puede no ser adecuado para datos en los que van a ser usados para extraer información biofísica cuantitativa. Eventualmente los sistemas de escaneo fallan para coleccionar datos al inicio de la línea de escaneo. Esto es llamado problema de inicio de línea.

Corrección para el error de la atenuación ambiental.

Cuando los sistemas de percepción remota funcionan adecuadamente, errores radiométricos pueden ser introducidos en los datos del sensor remoto. Las dos fuentes más importantes de atenuación ambiental incluyen:

- Atenuación atmosférica causada por dispersión y absorción en la atmósfera y,
- Atenuación topográfica.

Remoción de los efectos atmosféricos en datos de percepción remota.

La atenuación atmosférica puede ser removida por datos de percepción remota usando una de varias aproximaciones de acuerdo a Jensen (1996) El método de corrección radiométrica está en función de la naturaleza del problema, el tipo de datos disponibles de percepción remota, la cantidad de información de datos atmosféricos históricos *in situ* disponibles y la exactitud de la información biofísica disponible que será extraída de los datos de percepción remota.

Cuando se trata de extraer información biofísica de cuerpos de agua (por ejemplo clorofila a, sedimentos suspendidos o temperatura) o superficies vegetadas, las diferencias sutiles en la reflectancia (o emitancia) entre los constituyentes importantes pueden ser tan pequeños que la atenuación atmosférica la hace inseparable. En estos casos es necesario calibrar los datos de percepción remota con medidas biofísicas hechas *in situ* al mismo tiempo que el sensor remoto recolecta los datos. Sin embargo los coeficientes y constantes obtenidos tanto de las medidas *in situ* como de las medidas de percepción remota usualmente no se extienden geográficamente o a través del tiempo.

Es posible el uso de un modelo atmosférico para corregir los datos de percepción remota. Una atmósfera asumida es calculada usando la época del año, altitud, latitud y longitud del área de estudio. Esta aproximación puede ser exitosa cuando la atenuación atmosférica es relativamente pequeña comparada con la señal del terreno detectada de forma remota. El uso de un modelo atmosférico en conjunto con medidas atmosféricas *in situ* adquiridas en el momento en que se realiza la colección de datos, proporciona mejores resultados. Esto es conocido como corrección radiométrica absoluta. Teóricamente, el método de cancelación de la banda es capaz de proveer buenos resultados ya que utiliza trayectorias idénticas atmosféricas para canales que se están comparando. Esto es llamado corrección radiométrica relativa. (Jensen, 1996)

Es importante hacer notar que aunque ciertos procedimientos son frecuentemente usados no puede haber una lista estandarizada de los procedimientos de pre-procesamiento porque cada proyecto requiere de una atención individual y algunas decisiones de pre-procesamiento pueden ser de preferencia personal. Además la calidad de los datos de la imagen varía en gran medida,

pero algunos datos pueden no requerir el pre-procesamiento que debería ser necesario en otros casos. Jensen (1996) asegura que el pre-procesado en algunos casos puede ser de gran utilidad no obstante en algunos casos los resultados podrían no ser claros para la interpretación.

#### 2.10.1.2 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA ABSOLUTA DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA

La radiación solar no es afectada cuando viaja a través del vacío o el espacio. Cuando esta interactúa con la atmósfera de la Tierra es dispersada y absorbida. La suma de estas dos formas de pérdida de energía es llamada atenuación atmosférica. Este tipo de correcciones están orientadas a la obtención de reflectancia de superficie y requiere de condiciones atmosféricas ópticas como parámetros de entrada. Este tipo de corrección se puede subdividir en:

- Corrección atmosférica basada en la imagen, se aplica principalmente usando información extraída desde la imagen del satélite. Es decir, se usan datos derivados de análisis estadísticos de los datos de píxeles crudos. El más simple método es la sustracción del mínimo Número Digital (DN) en cada banda. Otros métodos se enlistan a continuación
  - Píxel Oscuro o Sustracción del Objeto Oscuro o método del Mínimo DN del Histograma, Densidad Oscura de Vegetación (DDV)
  - Método de Regresión.
- Correcciones que usan datos independientes para las condiciones ópticas incluyendo datos históricos, estándar y meteorológicos así como medidas in situ. Dentro de esta categoría de correcciones se encuentra ATCOR-2, se basa en información meteorológica disponible en el momento en que el satélite recorrió el área de estudio

En un caso ideal la energía radiante registrada por los detectores es una función absoluta de la cantidad del flujo radiante del campo de visión instantáneo (IFOV) de investigación. En la realidad otra energía radiante puede entrar al campo de visión desde diferentes trayectorias. La Figura 2.13 representa varias trayectorias y factores que determinan la radiancia que llega al sensor.

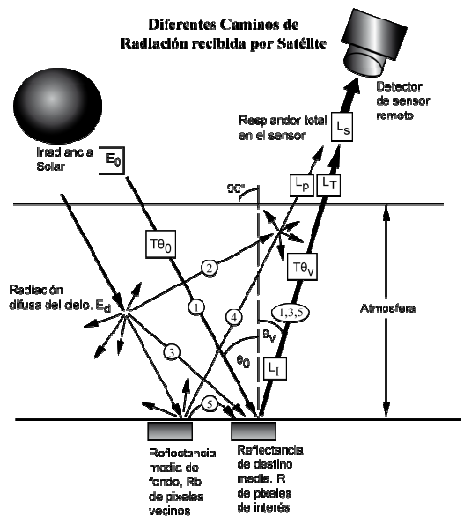


Figura 2.13 Trayectorias y factores que determinan la radiancia que llega al sensor (Jensen, 1996)

La trayectoria 1 contiene la energía electromagnética desde el sol que fue atenuada muy poco antes de iluminar el terreno dentro del IFOV

La trayectoria 2 contiene energía electromagnética que podría no llegar a la superficie de la Tierra, debido a la dispersión en la atmósfera causando la redirección de la trayectoria hacia el campo de visión del sensor.

La trayectoria 3 contiene energía desde el sol que pasa por algún tipo de dispersión (Rayleigh, Mie y/o selectiva) y tal vez por alguna absorción y re-emisión antes de iluminar el área de estudio.

La trayectoria 4 contiene radiación que fue reflejada o dispersada cerca del terreno ya sea nieve, concreto, suelo, agua y/o vegetación dentro del IFOV del sensor. La energía no ilumina en realidad el área de estudio.

La trayectoria 5 es la energía que fue reflejada desde la cercanía del terreno en la atmósfera y dispersada o reflejada sobre el área de estudio.

Solo una pequeña cantidad de irradiancia es reflejada realmente por el terreno en la dirección del satélite. Si se asume la superficie de la tierra como un reflector difuso (superficie lambertiana) la cantidad total de flujo radiante ( $W m^{-2}$ ) desde la superficie de la Tierra hasta el sensor es

$$L_T = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RT_{\theta_0} (E_{0\lambda} T_{\theta_0} \cos\theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda \quad (Wm^{-2}sr^{-1}) \quad \dots 7$$

Idealmente la radiancia que registra el sensor  $L_s$  sería igual a la radiancia que regresa desde el área de estudio. Sin embargo esto no sucede, La radiancia total ( $L_T$ ) es diferente a la radiancia registrada por el sensor ( $L_s$ ), debido a la radiancia agregada desde diferentes trayectorias que entran en el IFOV del sensor. A esto se le llama Trayectoria de radiancia  $L_p$ . Por lo tanto la radiancia total registrada por el sensor es la suma de de la trayectoria de radiancia total y la radiancia desde la superficie de la Tierra hasta el sensor.

$$L_S = L_T + L_p (Wm^{-2}sr^{-1}) \quad \dots 8$$

La correccional atmosférica intenta minimizar o remover la contribución de la trayectoria de radiancia  $L_p$  (Jensen, 1996)

### 2.10.1.3 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA RELATIVA DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA

Esta corrección no produce valores de reflectancia de superficie. El propósito es normalizar imágenes multitemporales para que las imágenes corregidas parezcan como si se hubieran obtenido bajo las mismas condiciones atmosféricas y con el mismo sensor como la imagen de referencia. La corrección relativa toma una banda y/o imagen como referencia y transforma las otras bandas y/o imágenes para igualarlas. Por ejemplo:

- Método de Normalización Multitemporal
- Análisis de Cromaticidad.

### 2.10.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA:

Los datos de percepción remota usualmente contienen tanto errores geométricos sistemáticos como no sistemáticos. Estos errores pueden ser divididos en dos clases:

1. Los que pueden ser corregidos usando efemérides de la plataforma y conocimiento de la distorsión del sensor.
2. Los que no pueden ser corregidos con exactitud sin un número suficiente puntos de control de tierra. Un punto de control en tierra (PCT) es un punto en la superficie de la Tierra donde tanto la imagen coordinada como el mapa coordinado puedan ser identificados. Estas distorsiones geométricas pueden ser corregidas a través del análisis de

las características del sensor y efemérides incluido el escaneo sesgado, distorsión panorámica, velocidad de la aeronave y geometría perspectiva. Estos pueden ser corregidos solo a través del uso de PCT.

Dos procedimientos comunes de corrección geométrica comúnmente utilizados son:

1. Rectificación imagen a mapa es el proceso por el cual la geometría de una imagen es hecha planimetría, este proceso normalmente implica la selección de PCT's.
2. Registro imagen a imagen es el proceso de traslación y alineación por el cual dos imágenes de geometría similar y de la misma área geográfica están posicionados coincidentes respecto a los demás de manera que los elementos de la misma área aparezcan en el mismo lugar que las imágenes registradas. Este tipo de corrección geométrica es usada cuando no es necesario tener cada píxel asignado a una única coordenada x, y en una proyección de mapas. Se realizan cuando se integran los datos a un sistema de integración geográfica (Campbell, 2002).

## 2.11 DESCRIPCIÓN DE DATOS

- DATOS RASTER

a) Imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7, sensor ETM+

AÑO	PLATAFORMA	SENSOR	MES	DIA	ARCHIVO
2002	Landsat 7	ETM+	Mayo	03	L71029046_04620020503
2002	Landsat 7	ETM+	Noviembre	11	L71029046_04620021111

La plataforma LANDSAT 7 se lanzó en abril de 1999 y continúa en funcionamiento en la actualidad. Sigue una órbita sincronizada con el sol. Está colocada a una altitud de 705 km y cubre el planeta cada 16 días excepto en altas latitudes polares. Tiene una resolución de 30x30 m<sup>2</sup>.

Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus): Cuenta con 8 bandas espectrales incluyendo una banda pancromática y una banda térmica.

Banda 1 Visible 0.45 – 0.52  $\mu\text{m}$

Banda 2 Visible 0.52 – 0.60  $\mu\text{m}$

Banda 3 Visible 0.63 – 0.69  $\mu\text{m}$

Banda 4 Infrarrojo cercano (NIR) 0.76 – 0.90  $\mu\text{m}$

Banda 5 Infrarrojo cercano 1.55 – 1.75  $\mu\text{m}$

Banda 6 Térmico 10.40 – 12.50  $\mu\text{m}$

Banda 7 Infrarrojo medio (MIR) 2.08 – 2.35  $\mu\text{m}$

Banda 8 Pancromática 0.52 – 0.90  $\mu\text{m}^2$

En la tabla 2. 1, se enlistan las principales aplicaciones que se les da a las diferentes bandas espectrales del sensor ETM+.

Tabla 2.1. Principales aplicaciones de las bandas del sensor ETM+

BANDA	LONGITUD DE ONDA ( $\mu\text{m}$ )	LOCALIZACIÓN ESPECTRAL NOMINAL	APLICACIONES PRINCIPALES
<b>1</b>	0.45 - 0.52	Azul	Diseñado para penetración de cuerpos de agua, útil para el mapeo de aguas costeras. Útil para discriminación de suelo/vegetación, mapeo de tipos de bosques e identificación de características culturales
<b>2</b>	0.52 - 0.60	Verde	Diseñado para medir el pico de reflectancia de vegetación, para la discriminación de vegetación y evaluación del vigor(salud)
<b>3</b>	0.63 - 0.69	Rojo	Diseñado para detectar la absorción de la clorofila, ayuda a la diferenciación de especies de plantas
<b>4</b>	0.76 - 0.90	IR Cercano	Útil para determinar picos tipos de vegetación, salud y contenido de biomasa, para delinear cuerpos de agua y discriminación de suelo húmedo.
<b>5</b>	1.55 - 1.75	IR Medio	Indicativo de contenido de humedad de la vegetación y suelo. Útil para la diferenciación de nieve y nubes.
<b>7</b>	2.08 - 2.35	IR Medio	Útil para la discriminación de tipos de minerales y rocas.

<sup>2</sup> [http://landsat.usgs.gov/about\\_mission\\_history.php](http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php)



- DATOS VECTORIALES

- b) Hidrología superficial Jalisco- Guanajuato

- Proyección cartográfica: UTM

- Datum de referencia: WGS84

- Escala 1:250 000

### 3. ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 LOCALIZACIÓN

El Lago de Chapala se encuentra entre las coordenadas  $102^{\circ} 42' 30''$  -  $103^{\circ} 25' 30''$  longitud oeste y  $20^{\circ} 6' 36''$  -  $20^{\circ} 18' 00''$  latitud norte, ver Figura 3.1 (Centrogeo, 2011). Está localizado al oeste de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), dentro del Rift Citala (Zárate-del Valle & Simoneit, 2005). El lago de Chapala es el vaso receptor natural más grande de la República Mexicana y el tercero en Latinoamérica, tiene una longitud y ancho máximos de 77.1 y 22 Km respectivamente. Sus principales afluentes son el Río Lerma, La Pasión y Zula. El Lago de Chapala se localiza en la zona hidrológica Lerma-Chapala que a su vez se incluye en región geohidrológica Lerma-Santiago-Pacífico No. 12 (DOF, 2006)

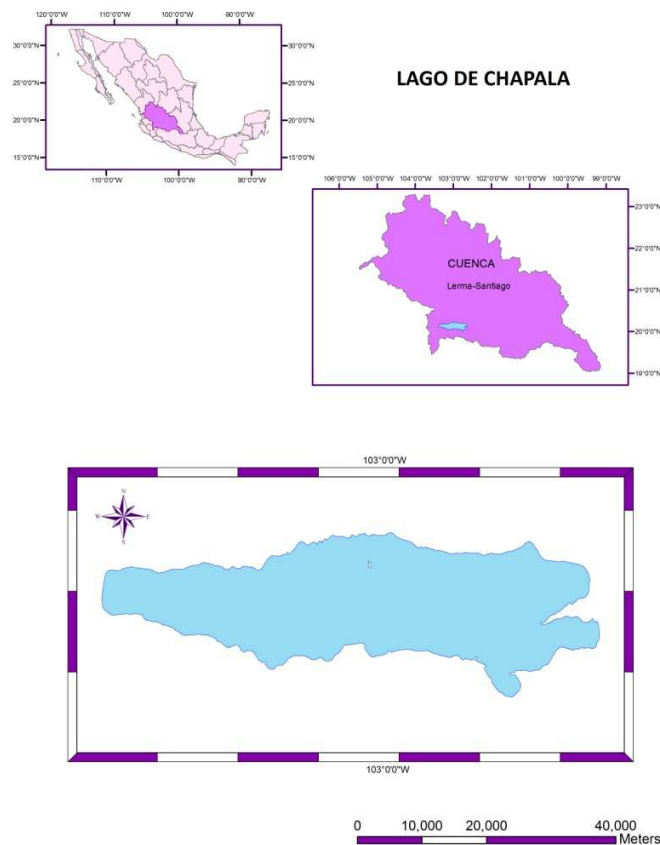


Figura 3.1 Localización del Lago de Chapala

La cuenca Lerma-Chapala se encuentra ubicada en el centro del país, comprendiendo parte de los estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Querétaro, incluyendo las cuencas cerradas de Cuitzeo y Pátzcuaro, con una superficie total de 51,887 Km<sup>2</sup>. La zona hidrológica Lerma-Chapala se encuentra limitada al Norte y Oeste por la zona hidrológica del río Santiago, perteneciente a la misma Región Hidrológica No. 12, al Sur por la Región Hidrológica número 18, al Este y Noreste por la Región Hidrológica No. 26. Geográficamente está comprendida entre los paralelos 19°03' y 21°32' de la latitud norte y los meridianos 99°18' y 103°46' de longitud oeste (DOF, 2006).

### 3.2 CLIMA

De acuerdo al sistema de clasificación de Köppen modificado por García, E. (García, 1988) para la cuenca Lerma-Chapala el clima dominante es C ( $\omega_0$ ) que corresponde a un clima sub-tropical, en el rango de sub-húmedo a árido.

Filonov et al. (1998), indican que los procesos climáticos en la región del Lago de Chapala son complejos. La precipitación promedio en la cuenca es de alrededor de 735mm por año y varía de 300 mm en años de sequía a 1200 mm en años húmedos. La variabilidad de las precipitaciones anuales causa importantes fluctuaciones temporales en el nivel del agua, área y volumen del lago. El ciclo de lluvias controlan las actividades de agricultura en la cuenca. La precipitación media anual en la zona hidrológica Rio Lerma-Chapala es de 771 mm (promedio en el periodo 1940-2001). El rango de evaporación de superficie es de alrededor de 1400 a 1600 mm por año que representan casi el doble del promedio de precipitaciones. (Aparicio, 2001). Los procesos dinámicos de viento y brisa se llevan a cabo como resultado de la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y la tierra circundante con poca cobertura, que durante el día se mantiene muy caliente mientras que por las noches es frío lo que causa la circulación de la brisa. La velocidad del viento llega a ser de 8-10 m/s y tiende a aumentar la evaporación de la superficie del lago.

### 3.3 GEOLOGIA GENERAL DEL OESTE DE MEXICO

La Faja Volcánica Transmexicana (FVT) es un arco continental complejo que se extiende desde el Volcán del pleistoceno San Juan al oeste, hasta el Volcán El Chichón al este de la República Mexicana. Una generalizada e intensa actividad volcánica y tectónica a finales del Cenozoico en el centro de México produjo numerosos bajos tectónicos y lagos de cráter. Varias de estas depresiones han sido ocupadas por lagos, este es el caso del Lago de Chapala que llena

parcialmente una cuenca de aproximadamente 115 Km de longitud y 37 Km de ancho con dirección E-W.

El lago de Chapala ocupa dos terceras partes de la depresión topográfica. Sedimentos lacustres y pluviales intercalados con unidades volcánicas, se han depositado en el graben Chapala que funcionan como registros históricos paleoambientales, volcánicos y tectónicos del Centro y Oeste de México. (Rosas-Elguera et al., 1997) .

La cuenca del lago de Chapala tiene establecida la misma tendencia E-W que el Rift Citala, que forma la llamada unión continental triple (PTJ, así nombrado por Zarate & Simoinet, 2005) de Jalisco con los rifts Tepic-Zoacalco y Colima. El lago se favorece por los bloques inclinados y depresiones relacionadas a las características tectónicas de la PTJ que los rodean.

Los depósitos lacustres de la cuenca del Lago de Chapala y las depresiones tectónicas de Zoacalco y Colima tienen alrededor de 900 y 1000 m de espesor. Estos sedimentos se componen de conglomerados, arenisca, limonita, arcilla, y unidades de piroclastos y horizontes de diatomitas. La gran depresión plana cerca del afluente del Río Lerma es llamada “La Ciénega” fue considerada un pantano hasta 1905 cuando se construyó el dique que segrega el lago de La Ciénega y encauza al Río Lerma hacia el lago (Sandoval, 1994).

Las islas Los Alacranes y Mezcala se componen de basalto vesicular; en la isla Los Alacranes existe actividad hidrotermal ligada a un sistema de fracturas N20 ° /70 ° SW rellenas de calcita y cuarzo. El marco geodinámico en el que se encuentra inmerso el lago de Chapala se expone en la Figura 3.2

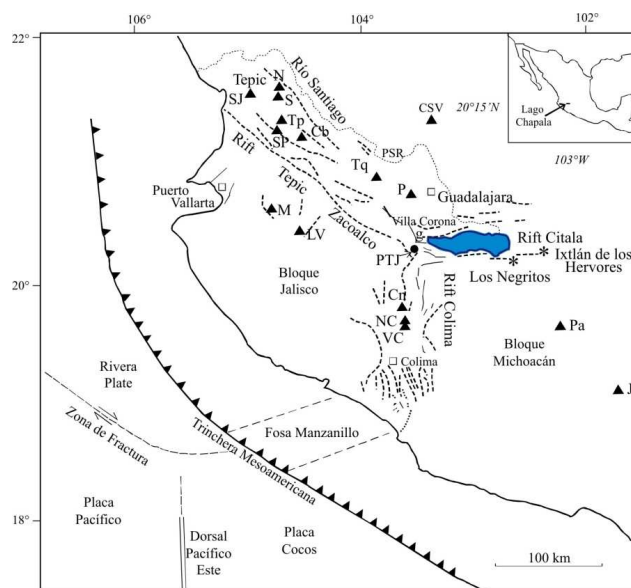


Figura 3.2 Marco geodinámico del occidente de México. Tomado de Zárata-del Valle & Simoinet, 2005

### 3.4 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL LAGO DE CHAPALA

#### 3.4.1 PROPIEDADES FÍSICAS.

El balance hidrológico consiste principalmente de dos fuentes de entrada: el río Lerma y la precipitación directa. Las salidas actuales son: agua para uso doméstico de la Ciudad de Guadalajara y evaporación. El lago es alargado en la dirección Este-Oeste (eje principal del lago). Lo somero del lago y la extracción de agua hacen que los vientos que tienen direcciones preferenciales a lo largo de su eje generen grandes olas que provocan una mezcla completa de sus aguas.

La poca profundidad del cuerpo de agua es la principal característica que determina la función del ecosistema, ya que permite el aumento de turbidez inorgánica a través de la resuspensión de arcilla fina. Las arcillas suspendidas son los principales factores en determinar las funciones de las comunidades en el Lago. La transparencia del lago es raramente influenciada por las masas de algas. La parte Este del lago tiene una gran variabilidad en las propiedades ópticas debido al florecimiento del fitoplancton. La temperatura media anual del lago es de alrededor de 22 ° C, con un rango estacional de 21 ° C a 23 ° C (Lind & Dávalos, 2001).

#### 3.4.2 SEDIMENTOS EN EL LAGO DE CHAPALA

Zarate et al. (2001), describe los sedimentos en el lago de Chapala como una mezcla de: plagioclasas, cuarzo, arcillas y carbonatos. Los principales óxidos detectados son:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$ . Los sedimentos someros están compuestos de algunos componentes orgánicos. Los minerales terrígenos dominan los sedimentos correspondientes al lago de Chapala. Los sedimentos someros (1.40 m) en el lago de Chapala son oscuros y limosos con granulometría media en el rango de 10-50 $\mu\text{m}$ . Además indica que los sedimentos representan una fuente importante de fósforo por el alto contenido de fósforo encontrado en núcleos obtenidos en los 90's.

### 3.5 FACTORES QUE MODIFICAN LA RESPUESTA ESPECTRAL DEL LAGO DE CHAPALA

La principal característica de la reflectancia espectral del agua es la absorción de energía en las longitudes de onda del IRC e IRM, por lo que la localización y delimitación de cuerpos de agua se realiza en estas longitudes de onda, sin embargo la interacción energía-materia en estas longitudes de onda es muy compleja ya que depende de diversos factores como la reflexión

especular o la interacción con la materia suspendida en el cuerpo de agua. La turbidez del agua cambia (debido a la presencia de materiales orgánicos e inorgánicos), provocando que la transmitancia y reflectancia se vean modificadas. Un cuerpo de agua que contiene grandes cantidades de sedimentos suspendidos (resultantes de la erosión del suelo y vertidos a lo largo de la cuenca de la cual forma parte ese cuerpo de agua) tiene alta reflectancia en el visible. Otro de los factores que modifican la reflectancia del agua es la presencia de clorofila contenida en el cuerpo de agua y que forma parte de su ecosistema.

El aumento en la concentración de vegetación detectada por pigmentos de clorofila tiende a disminuir la reflectancia en las longitudes de onda correspondientes al espectro visible, mientras que en la región del infrarrojo cercano (IRC) e infrarrojo medio (IRM) presentan una alta reflectancia.

Para el caso de vegetación acuática las características principales se encuentran en la región del rojo (0.6-0.69 $\mu$ m) que presenta una alta absorbancia y la región de IRC (0.7-1.3  $\mu$ m) donde la vegetación muestra una alta reflectancia. Los datos de reflectancia también son usados para determinar la presencia o ausencia de pigmentos de vegetación.

El lago es el vaso receptor de la cuenca Lerma-Chapala en cuya área se establece una fuerte actividad agrícola, industrial y poblacional recibe una gran cantidad de partículas suspendidas acarreadas a través del río Lerma lo que tiene por consecuencia una fuerte acumulación de sedimentos suspendidos que se traduce en una alta turbidez en el lago y por lo tanto en una alta reflectancia en términos espectrales.

### 3.6 DATOS GEOCIENTÍFICOS DISPONIBLES.

- c) Información de muestreo in situ de fósforo total (P-Tot.), realizado por el Centro de estudios limnológicos del Estado de Jalisco que se describe en la Tabla 3.1. Esta información se obtuvo de la Red Nacional de Monitoreo en la cuenca Chapala-Santiago-Pacífico a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Tabla 3.1. Información de Fósforo Total (P\_Tot g/l) obtenida de muestreo in situ del Centro de Estudios Limnológicos del Centro Estatal de Aguas de Jalisco.

ESTACION	X	Y	FECHA	P-Tot. mg/l	FECHA	P-Tot. mg/l
L_01	668015.808	2243253.62	07/05/2002	0.97	14/11/2002	0.75
L_02	669691.069	2238134.38	07/05/2002	1.19	14/11/2002	0.62
L_03	675859.311	2236689.09	07/05/2002	0.85	14/11/2002	1.13
L_04	683712.777	2235232.92	07/05/2002	1.00	14/11/2002	0.77
L_05	685632.553	2243003.54	07/05/2002	1.27	14/11/2002	0.72
L_06	683610.92	2242089.99			14/11/2002	1.11
L_07	677711.14	2242920.17	07/05/2002	0.68	14/11/2002	0.68
L_08	673097.934	2242842.51	07/05/2002	1.38	14/11/2002	0.54
L_10	691150.324	2245278.17	08/05/2002	0.65	15/11/2002	1.12
L_11	690127.966	2237977.87	08/05/2002	1.00	15/11/2002	1.74
L_12	690910.589	2232819.55	08/05/2002	1.16	15/11/2002	0.87
L_13	696049.792	2232876.87	08/05/2002	1.17	15/11/2002	0.99
L_14	702590.187	2234797.5	08/05/2002	0.72	15/11/2002	1.13
L_15	703686.337	2240346.71	08/05/2002	0.65	15/11/2002	0.91
L_16	701858.621	2247706.99	06/05/2002	1.18	13/11/2002	1.11
L_17	699218.009	2245215.7	06/05/2002	0.67	13/11/2002	0.49
L_20	714066.454	2246008.88	06/05/2002	1.55	13/11/2002	0.81
L_21	714135.12	2240473	06/05/2002	0.65	13/11/2002	0.91
L_22	719453.231	2233157.17	06/05/2002	0.98	13/11/2002	1.06
L_27	727994.541	2246187.48	06/05/2002	0.85	13/11/2002	1.12
L_28	721101.287	2240560.71	06/05/2002	0.83	13/11/2002	1.16

\*Nota: Sistema de referencia UTM. Datum WGS-84

## 4. METODOLOGÍA

El resumen de las técnicas utilizadas para el procesamiento de las imágenes de datos se resume en la siguiente Figura 4.1.

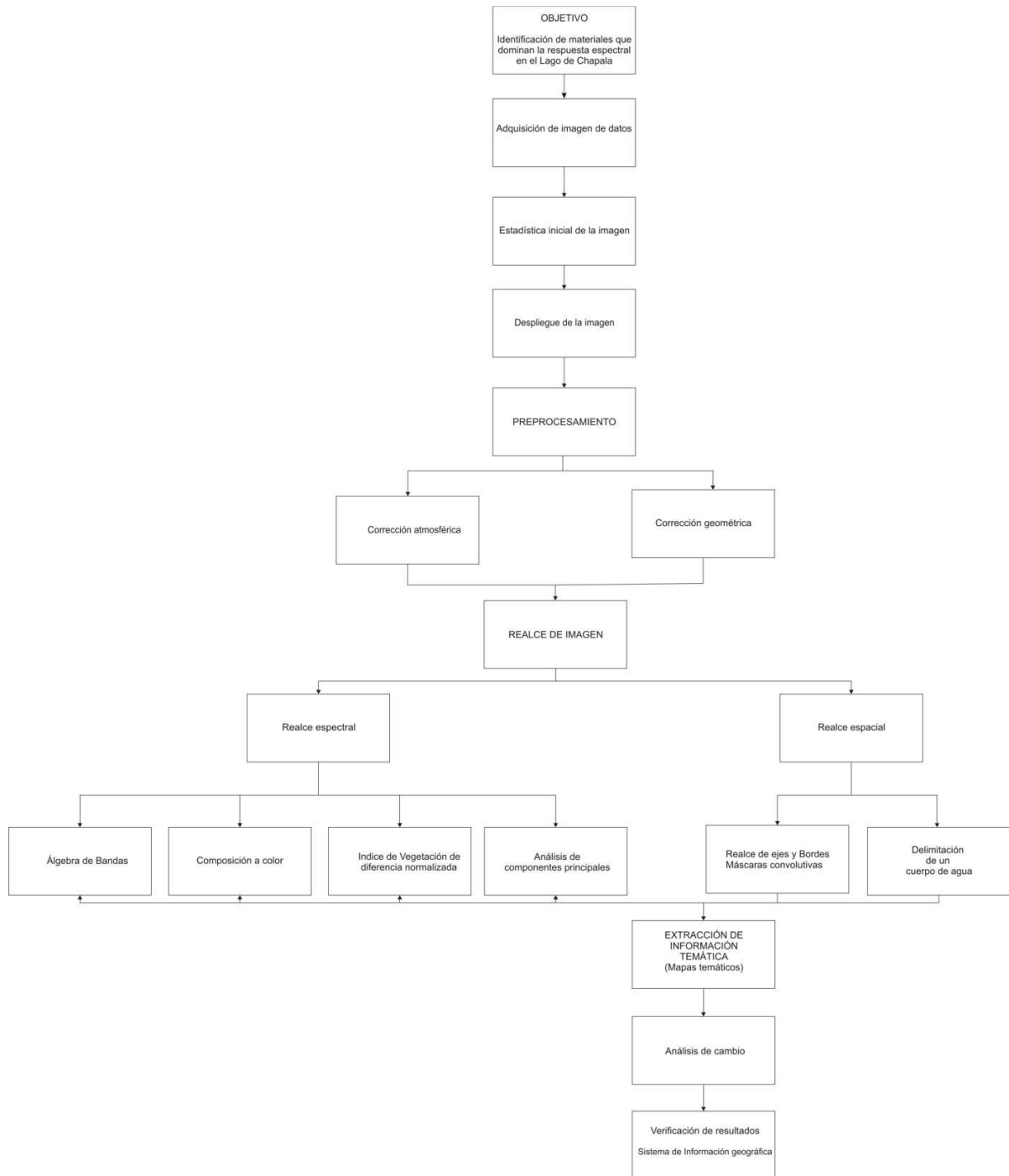


Figura 4.1 Procedimiento utilizado para el análisis de las imágenes de datos.



#### 4.1 PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.

##### 4.1.1 CÁLCULO ESTADÍSTICO UNIVARIADO DE LOS DATOS CRUDOS.

El procesamiento de una imagen satelital comienza con el despliegue de la información y el cálculo de las estadísticas univariada y multivariada de los datos de la imagen, con el fin de analizar la calidad de los datos.

Jensen (1996) señala que para imágenes satelitales es común que los datos de interés estén sesgados o que contengan valores extremos por lo que el promedio (siendo una medida de tendencia central) resulta ineficaz para arrojar información; sin embargo, las medidas de dispersión respecto a la media son adecuadas para proporcionar información sobre la dispersión y variabilidad de los datos.

La desviación estándar es la medida de variación más útil para el análisis estadístico y está dada en las mismas unidades que las observaciones. Una desviación estándar grande sugiere un mayor contenido de información en una banda o canal específico. La covarianza entre dos variables aleatorias muestra la variabilidad conjunta de estas dos variables, en tanto la correlación muestra el grado de interrelación entre dos variables.

##### 4.1.2 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Para extraer información significativa de las imágenes satelitales, se requiere analizar e interpretar la información que es proporcionada por el sensor ETM+.

En estudios de cuerpos de agua es esencial remover el efecto atmosférico a través de la aplicación de una corrección atmosférica, confiable y práctica.

La importancia de corregir atmosféricamente se debe a que las diferencias en la reflectancia de cada material de un cuerpo de agua puede ser tan sutil que podrían llegar a ser inseparables las firmas espectrales de cada material.

Para determinar el tipo de corrección atmosférica se consideraron diferentes características de la zona de estudio.

- Características físicas de la zona de estudio. El área de estudio es de 5179.815 km<sup>2</sup> de la cual el 21.21% corresponde al lago de Chapala; una quinta parte de la escena corresponde al cuerpo de agua. Tal característica sugiere que hay gran cantidad de evaporación por lo tanto mayor efecto atmosférico, sumado a esto se presenta la reflexión especular o superficie lambertiana debido al gran área del Lago.

- Características temporales. En la búsqueda de información se encontró que desde 2003 el sensor ETM+ se encuentra dañado y/o apagado por lo que se presenta bandeamiento por falta de información en todas las escenas (escenas disponibles de manera libre) desde la fecha mencionada hasta la actualidad, por lo que se recurrió a datos históricos que coincidieran con información in situ de la Red Nacional de Monitoreo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Esto nos lleva a la carencia de datos meteorológicos para la fecha en que el sensor ETM recolectó los datos estudiados.

Se realizó una corrección atmosférica absoluta ya que no se cuenta con los parámetros meteorológicos para realizar una corrección basada en datos independientes de condiciones ópticas de la atmósfera. Dentro de la corrección atmosférica absoluta no se sugiere el uso del método más común y sencillo que es la sustracción de píxel oscuro, ya que después de haber realizado el análisis estadístico del comportamiento de las observaciones indica que la sustracción del mínimo valor del histograma subestima el efecto atmosférico. Por lo tanto, se sugiere para el presente caso el uso de corrección atmosférica por regresión lineal de píxel oscuro, la cual se basa en el hecho de la existencia de una relación entre los VB's o números digitales (DN por sus siglas en inglés) del infrarrojo medio (Landsat TM banda 7, 2.2  $\mu\text{m}$ ) y la longitud de onda correspondiente al visible. Considerando la dependencia de las observaciones en la región visible del espectro EM con la región del IRM (Kaufman, Y. J., *et al.*, 1997), se utilizó el método de regresión lineal para obtener modelos matemáticos de la forma:

$$BV_{0.4\mu\text{m}} = mBV_{2.2\mu\text{m}} + b_{0.4\mu\text{m}} \quad \dots 1$$

Donde

$$m = \frac{BV_{0.4\mu\text{m}}}{BV_{2.2\mu\text{m}}}$$

$BV_{0.4\mu\text{m}}$  es el valor de brillo predicho de la banda espectral ETM1 (0.4-0.5 $\mu\text{m}$ )

$BV_{2.2\mu\text{m}}$  es el valor de brillo de la banda espectral independiente, es decir, la banda ETM7 que teóricamente no está influenciada por el efecto atmosférico.

$b_{0.4\mu\text{m}}$  es la ordenada al origen del modelo matemático.

La intersección de  $b_{0.4\mu\text{m}}$  con  $BV_{0.4\mu\text{m}}$  se interpreta como el efecto atmosférico sobre la variable dependiente.

#### 4.1.3 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA.

Los datos satelitales del sensor ETM+ proporcionados por el USGS (2009), están provistos del nivel de corrección 1T que corresponde a una corrección de terreno, es decir, que ya han sido corregidos geométricamente a través de puntos de control en tierra (GPC). No obstante se realizó una verificación por medio de comparación con el mapa vectorizado de hidrología superficial (INEGI, 2001).

#### 4.2 REALCE ESPECTRAL

La información obtenida tras la corrección atmosférica y geométrica proporciona en BV la reflectancia en la superficie de la Tierra. Para cumplir con el objetivo del estudio se obtuvo una máscara para la extracción de información espectral a partir de los datos vectoriales de la carta de aguas superficiales. El lago de Chapala se representa por un polígono de agua perenne, descrito y localizado por INEGI, 2001. Por lo tanto la información espectral extraída en lo subsecuente será referida con el término: datos.

#### 4.2.2 COCIENTE DE BANDAS.

En datos de imágenes satelitales, el cociente de bandas mejora los cambios en los gradientes de las curvas de reflectancia espectral de diferentes materiales, ya que estos cambios se acentúan al realizar el cociente. La relación o cociente entre dos números típicamente proporciona un número real. Descontando la división por cero, la relación puede ser tan alta como 255 pero en la práctica la relación es bastante baja, generalmente menos que 5. Antes de ser desplegada una relación de imagen o cociente de imagen, puede ser escalada para aumentar el rango dinámico y convertir a números enteros. La corrección atmosférica debe ser sustraída antes de realizar el cociente.

Un cero en el numerador con un número real en el denominador da un cociente de cero. Sin embargo la división por cero proporciona un valor infinito el cual es predeterminado a 255, aunque el operador puede tener la opción de establecer este valor a cero. La división de cero por cero no está definida y el cociente puede ser asignado a un valor de cociente de cero. La división por cero o tener un cero en el numerador puede prevenirse asignando un número digital (ND) de 1 a los píxeles cuyo valor de brillo sea cero después de realizar la corrección atmosférica. Para altos ND este enfoque puede ser justificado porque la relación de  $223/14$  está muy cerca de  $224/15$ . Sin

embargo a un bajo ND este proceso puede producir errores significativos: una relación de 10/1 no es casi lo mismo como la relación 11/2. Si una relación normalizada es producida, donde la diferencia entre las dos bandas es dividida por la suma de las mismas dos bandas, la relación variará entre -1 y 1 (asumiendo que la división por cero es cero) (Gibson & Clare, 2000). La expresión matemática de la función de cocientes de bandas está dada por la siguiente expresión.

$$BV_{i,j,r} = \frac{BV_{i,j,k}}{BV_{i,j,l}} \quad \dots 2$$

Donde:

$BV_{i,j,r}$  es el valor de la relación para el píxel en la fila i, columna j

$BV_{i,j,k}$  es el valor de brillo en la misma posición de píxel en la banda k

$BV_{i,j,l}$  es el valor de brillo en la misma posición de píxel en la banda l

De acuerdo al objetivo planteado, las características ópticas del cuerpo de agua en estudio están dominadas por la presencia de vegetación acuática, sedimentos suspendidos y áreas con bajos niveles de turbidez. Por lo tanto para determinar las áreas que están cubiertas por cada uno de los materiales de interés es necesario identificar los rasgos característicos de cada material y los rangos del espectro EM en los que se presentan. La Tabla 4.7 muestra las bandas espectrales en donde se observan las principales características espectrales de cada material con base en la respuesta espectral teórica.

Tabla 4.7 Principales características espectrales de los materiales de estudio.

MATERIAL	ALTA REFLECTANCIA	ALTA ABSORCION
Vegetación	ETM4 ETM2	ETM 3, ETM5 y ETM7
Sedimentos suspendidos rojos (óxidos de fierro)	ETM3, ETM5,ETM7	ETM1, ETM2
Sedimentos suspendidos (tipo arcillosos)	ETM5	ETM7

Los sedimentos suspendidos son una mezcla de material orgánico e inorgánico que son transportados preferentemente por los afluentes del lago de Chapala. En este cuerpo de agua la dinámica de los vientos dominantes de la zona promueve la resuspensión de sedimentos por lo que las propiedades ópticas de este cuerpo de agua están regidas por la gran acumulación de material suspendido y vegetación acuática. Para los sedimentos suspendidos Campbell (2002) propone el cociente  $ETM3/ETM1$  para sedimentos rojos al cual se agregará el cociente  $ETM3/ETM7$  para incluir sedimentos arcillosos cuya característica de absorción se presenta en la banda  $ETM7$  con la finalidad de mapear la mayor parte de los sedimentos en suspensión presentes en el cuerpo de agua.

Los cocientes de bandas forman parte del álgebra de bandas espectrales que no es más que el uso de operaciones matemáticas (suma, resta, división, multiplicación y operaciones lógicas) que permitan enfatizar la información de interés.

#### 4.2.3 METODO DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

El índice de vegetación está basado en los valores de brillos digitales mide la biomasa o el estado de la vegetación. El índice de vegetación está formado por la combinación de varios valores espectrales que son añadidos, divididos o multiplicados en una manera definida para proporcionar un valor único que indique la cantidad o estado de la vegetación mediante un píxel. Algunas relaciones de banda han sido definidas aplicando el conocimiento del comportamiento espectral de la vegetación viva.

Las relaciones de bandas son cocientes entre medidas de reflectancia en porciones separadas del espectro. Las relaciones son efectivas en mejorar o revelar información latente cuando es una relación inversa entre dos respuestas espectrales para varios fenómenos biofísicos. Si dos características tienen el mismo comportamiento espectral, la relación provee poca información pero si hay bastante diferencia en la respuesta espectral, la relación entre los dos valores provee un único valor que expresa el contraste entre las dos reflectancias.

Para la vegetación viva, la relación estratégica puede ser especialmente efectiva porque la relación inversa entre el brillo de la vegetación en la región del rojo (R) y el infrarrojo, esto es la absorción de la luz roja de la clorofila y su fuerte reflexión de la radiación en el Infrarrojo (IR) como se

observa en la Figura 4.2. La relación IR/R en plantas sanas es alta. Para suelo desnudo, vegetación estresada o muerta esta relación decrece en magnitud. Por lo que la relación IR/R proporciona una medida de actividad fotosintética y de biomasa dentro de un píxel. Esta relación es una forma de medir la abundancia de la vegetación o el estado de ésta.

Una relación muy usada en índices de vegetación es la conocida como índice de vegetación de diferencia normalizado NDV

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

Esta relación proporciona la misma información que la relación IR/R la diferencia es que el valor del NDVI se encuentra entre -1 a 1.

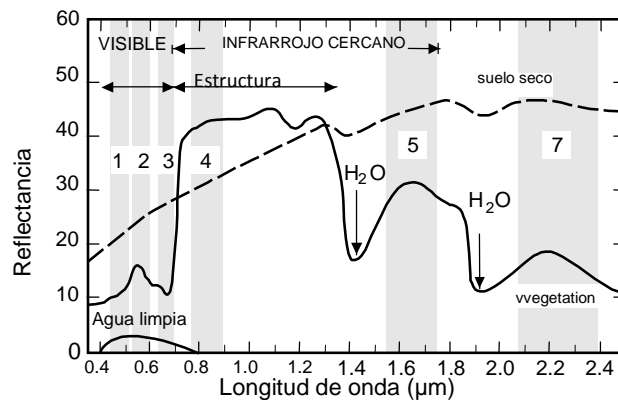


Figura 4.2 .Respuesta espectral de la vegetación en función de los pigmentos de clorofila.

#### 4.2.4 COMPOSICIÓN A COLOR.

Es una técnica que permite visualizar la respuesta de un material en rangos de longitud que el ojo humano no percibe así como resaltar la respuesta espectral de los diferentes materiales de estudio (vegetación, sedimentos y respuesta espectral del agua más limpia sobre el área de estudio). En ésta técnica se despliegan tres bandas espectrales en los tres diferentes cañones del

sistema RGB. Cuando las bandas espectrales no coinciden con el cañón correspondiente a su longitud de onda se dice que la composición es un falso color.

Para el lago de Chapala se propone en ambas fechas una composición 431 que realza la respuesta espectral de pigmentos de clorofila (ETM4) y sedimentos en general (ETM3).

#### 4.2.5 MÉTODO DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Los objetivos de análisis por componentes principales son:

- Generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto original de datos.
- Reducir la dimensionalidad del problema que se está estudiando.
- Eliminar cuando sea posible, algunas de las variables originales, cuando aportan poca información.

Las nuevas variables generadas se denominan componentes principales y poseen algunas características estadísticas deseables, tales como independencia (cuando se asume multinormalidad). Esto significa que si las variables originales no están correlacionadas, el análisis por componentes principales no ofrece ventaja alguna.

El análisis por componentes principales se aplica cuando se dispone de un conjunto de datos multivariados y no se pueden postular sobre la base de conocimientos previos del universo en estudio. El análisis de componentes principales se aplica cuando se desea conocer la relación entre los elementos de una población y se sospecha que en dicha relación influye de manera desconocida un conjunto de variables o propiedades de los elementos.

Las componentes principales tienen ciertas características que son deseables:

- Los componentes principales no están correlacionados y si se puede suponer multinormalidad en los datos originales, además son independientes.
- Cada componente principal sintetiza la máxima variabilidad residual contenida en los datos

#### 4.2.5.1 NUEVA EXPRESION DE LOS DATOS

Si se conocen los valores propios generados por la matriz de covarianza de un conjunto de datos, es posible calcular todas las constantes que forman la matriz de transformación L. La matriz L se puede multiplicar por la matriz X original para obtener una nueva matriz de datos Y. Esta nueva matriz de datos transformada tendrá las características siguientes:

Para cada observación tendrá p valores que corresponden a cada una de las componentes

La matriz de covarianza de este conjunto de datos será diagonal, debido a que las nuevas variables no están correlacionadas, y los valores de las varianzas de cada variable serán los valores propios encontrados al resolver el polinomio característico de la matriz de covarianza de los datos originales

La varianza de la primera componente principal será mayor, y cada uno de las siguientes componentes tendrá una varianza menor, hasta que la última componente será la que posea la menor varianza.

El vector promedio de la nueva matriz también experimentará la misma transformación lineal:

$$Y = XL \quad \dots \quad 3$$

#### 4.2.5.2 MATRIZ DE CORRELACIÓN

Si se emplean los datos estandarizados en la matriz de transformación, a partir de la matriz de covarianza será posible calcular la matriz de correlación.

Los valores de la diagonal principal de la matriz de correlación (R) son números 1 ya que las nuevas variables estandarizadas poseen varianza unitaria. Esto significa que en el conjunto de datos originales se aplica la misma importancia a todas las variables observadas.

#### 4.2.6 TÉCNICA DE CROSTA O ANÁLISIS DE COMPONENTES ORIENTADAS (ACPO)

Se basa en el análisis de componentes principales y permite la identificación espectral de materiales de interés y de la contribución de cada banda espectral relacionada a la firma espectral teórica del material de interés. Esta técnica proporciona información con base en el signo de la



carga de información relacionada con la banda espectral y la componente principal resultante ya que, si es negativo la información se verá en tonos oscuros y el signo positivo indica que los tonos brillantes representan la información de interés.

#### 4.3 REALCE ESPACIAL

Una característica de las imágenes de percepción remota es un parámetro llamado frecuencia espacial que se define como el número de cambios en los valores de brillo por distancia unitaria en cualquier parte de la imagen. Si hay pocos cambios en los BV en un área dada se dice que es un área de baja frecuencia. Por el contrario si los BV cambian abruptamente en una pequeña área se dice que es un área de alta frecuencia.

La frecuencia espacial en percepción remota puede ser realizada usando dos diferentes enfoques:

- Técnica del Análisis de Fourier.
- Filtrado de convolución espacial.

##### 4.3.1 REALCE DE EJES Y BORDES EN EL DOMINIO ESPACIAL.

Una de las aplicaciones más importantes de la percepción remota es la localización de límites y ejes de un objeto en estudio, por ello los ejes principales de un objeto y que son aquellos que le dan forma pueden ser delineados usando la técnica de realce de ejes lineales y no lineales

###### 4.3.1.1 REALCE DE EJES O BORDES LINEALES

Uno de los métodos útiles para la extracción de ejes direccionales es la técnica de máscaras de gradientes direccionales, es decir de la diferenciación discreta bidimensional, donde el nombre de la máscara sugiere la dirección de máxima pendiente. Las máscaras se definen a continuación:

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{ccc}
 & 1 & 1 & 1 \\
 \text{Norte} = & 1 & -2 & 1 \\
 & -1 & -1 & -1
 \end{array}
 &
 \begin{array}{ccc}
 & -1 & -1 & -1 \\
 \text{Sur} = & 1 & -2 & 1 \\
 & 1 & 1 & 1
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{ccc}
 & -1 & 1 & 1 \\
 \text{Este} = & -1 & -2 & 1 \\
 & -1 & 1 & 1
 \end{array}
 &
 \begin{array}{ccc}
 & 1 & 1 & -1 \\
 \text{Oeste} = & 1 & -2 & -1 \\
 & 1 & 1 & -1
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{rcc}
 & 1 & 1 & 1 \\
 \text{Noreste} = & -1 & -2 & 1 \\
 & -1 & -1 & 1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{rcc}
 & -1 & -1 & 1 \\
 \text{Sureste} = & -1 & -2 & 1 \\
 & 1 & 1 & 1
 \end{array}$$

#### 4.3.2 DELIMITACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

Se aplicó la técnica descrita en Campbell (2002), para delimitar cuerpos de agua con áreas inundadas de acuerdo a la temporada de lluvias. La técnica propone delinear áreas inundadas a través del uso de las regiones espectrales del 0.5- 0.6  $\mu\text{m}$  (ETM2) por las fuertes contribuciones de sedimentos en suspensión y la región del IRC e IRM (ETM5 ó ETM7) por la alta absorbancia que presentan los cuerpos de agua. La técnica compara los BV entre IR y el visible (0.5-0.6  $\mu\text{m}$ ) de dos diferentes fechas.

$$\frac{ETM2(\text{sin inundar}) - ETM 5 \text{ ó } ETM7(\text{inundado ó sin inundar})}{ETM2(\text{sin inundar})}$$

Esta relación se basa en considerar que la respuesta espectral del suelo es similar en la región del visible (ETM2) y en la región del IR (ETM5 ó ETM7) por lo que en el caso de que un determinado píxel corresponda a suelo seco la relación propuesta resulta en cero, mientras que si se trata de una zona inundada el cociente será uno. Por ejemplo si la tierra seca tiene valores cercanos a 35 en ambas bandas, entonces para áreas inundadas la relación es  $(35-0)/35=1$  y para áreas sin inundar  $(35-35)/35=0$ .

El principal problema que se presenta en esta técnica es cuando la alta concentración de sedimentos no permite que haya un contraste entre ambas regiones espectrales tal que se consiga la separación de áreas inundadas de no inundadas.

#### 4.4 EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TEMÁTICA

Una ventaja del estudio de percepción remota en ciencias de la tierra es que se puede extraer información útil. La clasificación multispectral es uno de métodos de extracción de información más utilizados. Este procedimiento implica que la información será capturada en diferentes regiones del espectro electromagnético y que se ha realizado el preprocesamiento a las imágenes. La clasificación multispectral se realiza a través de una diversidad de algoritmos como: clasificaciones duras utilizando enfoques supervisados o no supervisados, clasificación usando lógica de difusa y enfoques híbridos que involucran el uso de información secundaria.

##### 4.4.1 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Esta clasificación asume que se han localizado los diferentes tipos de cobertura del área en estudio, uso de suelo y/o clase, a través del trabajo de campo, análisis de imágenes aéreas o satelitales, mapas y/o experiencia personal. Estas áreas sirven como áreas de entrenamiento (también conocido como polígono de entrenamiento) para el algoritmo de clasificación, ya que contienen las características espectrales del material de interés. Para cada sitio de entrenamiento el algoritmo calcula los parámetros estadísticos multivariados (media, desviación estándar, matriz de covarianza, matriz de correlación, etc.). El algoritmo de clasificación evalúa cada píxel que no forma parte de los polígonos de entrenamiento para asignarlo a la clase del que tenga la mayor probabilidad de pertenecer (Jensen, 1996).

##### 4.4.2 MÉTODOS ESPECÍFICOS PARA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

###### 4.4.2.1 CLASIFICACIÓN DE PARALELEPÍPEDO

También es conocido como reglas de decisión de caja, está basado en el rango de valores del polígono de entrenamiento que define regiones en un espacio multidimensional. Los valores espectrales de píxeles no clasificados son proyectados en el espacio, si estos datos caen dentro de las regiones que ocupan los polígonos de entrenamiento, entonces éstos se asignan a la categoría adecuada.

#### 4.4.2.2 CLASIFICACIÓN DE MÍNIMA DISTANCIA

Esta clasificación considera los valores centrales o la media estadística de los datos espectrales de los polígonos de entrenamiento. Si los datos espectrales se dibujan en un espacio multidimensional se distribuirían en agrupaciones con similares características espectrales llamadas clúster. La media o el valor central de estos datos representaría el clúster. Para un píxel no clasificado, el algoritmo calcula la distancia entre éste píxel y el punto central de cada clúster y lo asigna a la clase cuya distancia sea mínima.

#### 4.4.2.3 CLASIFICACIÓN DE MÁXIMA PROBABILIDAD.

En percepción remota es difícil obtener registros espectrales puros debido a la atmósfera, sombras topográficas y efecto de mezcla de materiales en un solo píxel. Por lo tanto la asignación de un píxel que mezcla la reflectancia de dos o más materiales requiere de un análisis de probabilidad. La clasificación de máxima probabilidad considera la media y la variabilidad de los datos, por lo que requiere de una gran cantidad de cálculos que implica un consumo mayor de recursos computacionales. Este algoritmo de clasificación es sensible a la calidad del polígono de entrenamiento. El cálculo de la estimación de probabilidades está basado en la suposición de que los datos de entrenamiento siguen una distribución de frecuencia multivariada, por lo que los polígonos de entrenamiento deben exhibir distribuciones unimodales. Esta regla no decide el uso del clasificador sin embargo es aconsejable.

El algoritmo se basa en el Teorema de Bayes lo que requiere del conocimiento de la probabilidad de ocurrencia de las diferentes clases, coberturas o usos de suelo que ocurren en el área de estudio.

Se realizó una clasificación supervisada a partir de las respuestas espectrales teóricas de los diferentes materiales de estudio, con el objetivo de cuantificar las áreas en la superficie del lago de Chapala cubiertas de pigmentos de clorofila, obtención de mapas temáticos que permita visualizar las áreas del cuerpo de agua cubiertas por pigmentos de clorofila, sedimentos en suspensión y áreas donde la superficie del cuerpo de agua muestra las propiedades ópticas típicas

de un cuerpo de agua limpio. La obtención de un mapa temático permite obtener las áreas donde existe presencia de pigmentos de clorofila y sedimentos en suspensión.

## 5. RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DEL LAGO DE CHAPALA

De las imágenes crudas obtenidas del United States Geological Survey (USGS), se obtuvo una ventana cuya área incluye el cuerpo de estudio. El área de estudio está definida por las siguientes coordenadas UTM, Datum WGS-84.

Mín. X 652293.75 Máx. X 743815.38

Mín. Y 2221957.1 Máx. Y 2278560.75

### 5.1 CÁLCULO ESTADÍSTICO UNIVARIADO DE LOS DATOS CRUDOS

En la tabla 5.1 se resume el análisis estadístico realizado a las imágenes satelitales de las diferentes fechas de estudio obtenido del cálculo estadístico de la totalidad de las observaciones.

Tabla 5.1. Análisis estadístico de la información original satelital.

BANDA	MINIMO VB*	MAXIMO VB*	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	VARIANZA
2002mayo					
banda ETM1	68	255	107.559	13.424	180.20
banda ETM2	49	255	93.937	16.885	285.1
banda ETM3	42	255	110.042	25.887	670.14
banda ETM4	20	255	66.733	21.159	447.70
banda ETM5	10	255	123.694	49.304	2430.88
banda ETM7	3	255	93.165	37.149	1380.05
2002noviembre					
banda ETM1	41	255	63.905	10.666	113.76
banda ETM2	24	255	53.314	12.103	146.48
banda ETM3	16	255	52.787	16.521	272.94
banda ETM4	10	159	49.877	16.928	286.56
banda ETM5	3	255	69.038	30.501	930.31
banda ETM7	2	255	44.639	21.041	442.72

\*VB valor de brillo

Para la obtención de los píxeles oscuros se analizó la banda ETM7, ya que esta banda espectral es la menos influenciada por efectos atmosféricos y la mayoría de los aerosoles, realizando una reclasificación de valores de brillo con la finalidad de obtener una máscara que permita la extracción de información de píxeles negros en todas las bandas espectrales. El criterio de reclasificación fue el mostrado en la Tabla 5.2

Tabla 5.2 Criterio de selección de píxeles oscuros en la escena en estudio

FECHA	INTERVALO DE VALORES "DN" ASUMIDOS COMO PÍXELES NEGROS
MAYO 2002	0-8
NOVIEMBRE 2002	0-7

La máscara de píxeles negros en la que se basa la regresión lineal para la extracción del efecto atmosférico a través de la cuantificación de la ordenada al origen, se muestra en la figura 5.1.

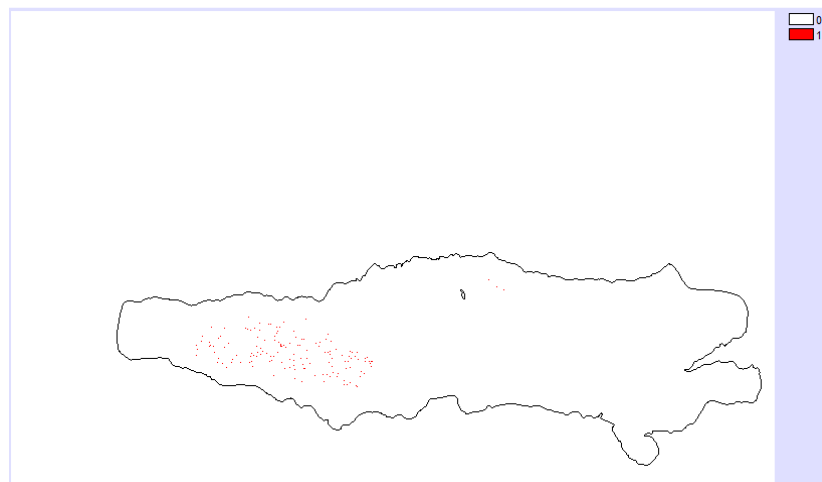


Figura 5.1 Mascara de píxeles negros del mes de mayo 2002

El resultado de aplicar el método de regresión lineal a la máscara obtenida para los meses de mayo y noviembre de 2002 se resume en la Tabla 5.3 Dicho resultado se obtuvo de la extracción de datos de BV y de su análisis con el programa *Statistica* versión 6.0

Tabla 5.3. Valores de la ordenada al origen obtenidos de los modelos matemáticos.

REGRESIÓN LINEAL ENTRE BANDAS.	ORDENADA AL ORIGEN "Efecto atmosférico"
<b>Mayo 2002</b>	
ETM7/ETM1	111
ETM7/ETM2	96
ETM7/ETM3	91
ETM7/ETM4	24
ETM7/ETM5	15
<b>Noviembre 2002</b>	
ETM7/ETM1	78
ETM7/ETM2	69
ETM7/ETM3	70
ETM7/ETM4	19
ETM7/ETM5	10

## 5.2 REALCE ESPECTRAL

Realizando un nuevo cálculo estadístico de los datos que conforman la escena se obtiene la Tabla 5.4, mientras que en la Tabla 5.5 se muestra la matriz de correlación de las bandas espectrales no térmicas del sensor ETM+

Tabla 5.4 Análisis estadístico de la información sin efecto atmosférico y reclasificada.

BANDA	MINIMO BV*	MAXIMO BV*	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	VARIANZA
2002mayo					
banda ETM1	0	144	3.654	8.446	71.335
banda ETM2	0	159	5.547	11.139	124.077
banda ETM3	0	164	20.977	23.689	561.1687
banda ETM4	0	231	42.738	21.138	446.815
banda ETM5	0	240	108.710	49.243	2424.873
banda ETM7	0	252	90.165	37.149	1380.048
2002noviembre					
banda ETM1	0	177	0.795	4.336	18.801
banda ETM2	0	186	0.875	4.875	23.766
banda ETM3	0	185	1.628	7.293	53.188
banda ETM4	0	140	31.062	16.570	274.565
banda ETM5	0	245	59.057	30.374	922.58
banda ETM7	0	253	42.639	21.041	442.724



Tabla 5.5 Matriz de correlación de coeficiente de Pearson de las bandas espectrales de mayo y noviembre2002

<b>COR MATRIX</b>	<b>20020503_b10</b>	<b>20020503_b20</b>	<b>20020503_b30</b>	<b>20020503_b40</b>	<b>20020503_b50</b>	<b>20020503_b70</b>
20020503_b10	1					
20020503_b20	0.968244	1				
20020503_b30	0.828637	0.902083	1			
20020503_b40	0.343836	0.427977	0.635495	1		
20020503_b50	0.316825	0.422163	0.678967	0.915714	1	
20020503_b70	0.436912	0.519732	0.738637	0.87429	0.976098	1
<b>COR MATRIX</b>	<b>20021111_b10</b>	<b>20021111_b20</b>	<b>20021111_b30</b>	<b>20021111_b40</b>	<b>20021111_b50</b>	<b>20021111_b70</b>
20021111_b10	1					
20021111_b20	0.829017	1				
20021111_b30	0.674589	0.841501	1			
20021111_b40	-0.022027	0.004802	0.056331	1		
20021111_b50	-0.038685	-0.025062	0.022737	0.839574	1	
20021111_b70	0.128394	0.12653	0.14487	0.771154	0.962092	1

Tabla 5.6 Resumen del comportamiento estadístico de los datos corregidos atmosféricamente

<b>Mes</b>	<b>MAYOR VARIANZA</b>	<b>MENOR VARIANZA</b>	<b>ALTA CORRELACIÓN</b>	<b>BAJA CORRELACIÓN</b>
Mayo 2002	ETM5	ETM1	ETM2 y ETM1 ETM3 y ETM2 ETM5 y ETM4 ETM5 y ETM4	ETM1 y ETM5
Noviembre 2002	ETM5	ETM1	ETM5 y ETM7	ETM1 Y ETM4

### 5.2.1 COCIENTES DE BANDAS

MAYO 2002.

Para la vegetación acuática, detectada como pigmentos de clorofila, la banda de absorción se presenta en  $0.68 \mu\text{m}$ , en la parte roja del espectro visible, en tanto el principal rasgo de reflexión se encuentra en la región del infrarrojo cercano. Con base en lo anterior se propuso el cociente  $\text{ETM4}/\text{ETM3}$  donde se presenta el mayor contraste de la respuesta espectral de pigmentos de clorofila. El resultado se muestra en tonos brillantes en la figura 5.2

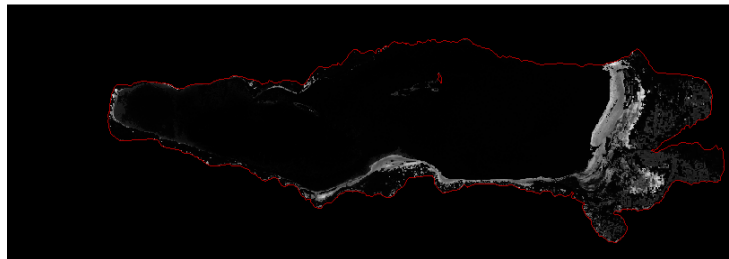


Figura 5.2 Cociente  $\text{ETM4}/\text{ETM3}$  donde en tonos brillantes se representa la contribución de pigmentos de clorofila en el área que ocupa el lago de Chapala.

Para los sedimentos en suspensión o material suspendido se propone  $\text{ETM3}/\text{ETM1}$  para sedimentos rojos (ver Figura 5.3) al cual se agregará el cociente  $\text{ETM3}/\text{ETM7}$  para incluir sedimentos arcillosos cuya característica de absorción se presenta en la banda  $\text{ETM7}$  con la finalidad de mapear la mayor parte de los sedimentos en suspensión presentes en el cuerpo de agua

La imagen resultante del cociente  $\text{ETM3}/\text{ETM7}$  se muestra en la Figura 5.4 donde se observa que la respuesta espectral dominante del cuerpo de agua corresponde a sedimentos cuyo origen son materiales con una alta absorbancia en la región del IRM ( $2.2 \mu\text{m}$ ). Se observa en la parte occidental (recuadro) del cuerpo de agua una zona con contribuciones de este tipo de material suspendido.

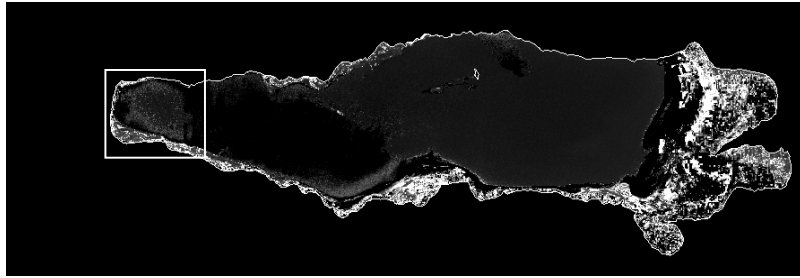


Figura 5.3 Cociente  $ETM3/ETM1$  que mapea materiales suspendidos provenientes de materiales en cuya estructura se encuentra el hierro. Dicha contribución se presenta en tonos brillantes.

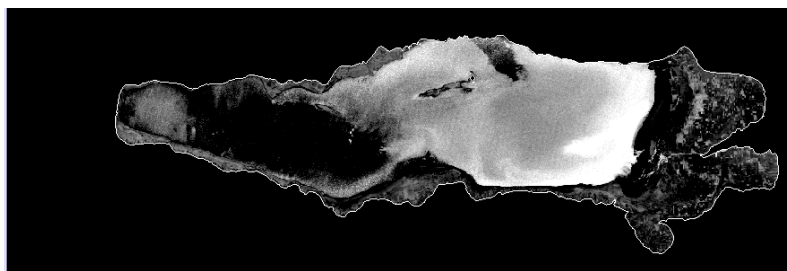


Figura 5.4 Resultado del cociente  $ETM3/ETM7$  que abarca sedimentos arcillosos considerando la alta absorción de energía que presenta en la banda  $ETM7$ . Los tonos brillantes indican la contribución de materiales que corresponden a material en suspensión de origen arcilloso.

La suma de los cocientes propuestos para mapear sedimentos suspendidos de diferentes orígenes ( $ETM3/ETM1$ ,  $ETM3/ETM7$ ), se muestran en la Figura 5.5. Los tonos brillantes indican que la escena está dominada por la respuesta espectral de sedimentos en suspensión.

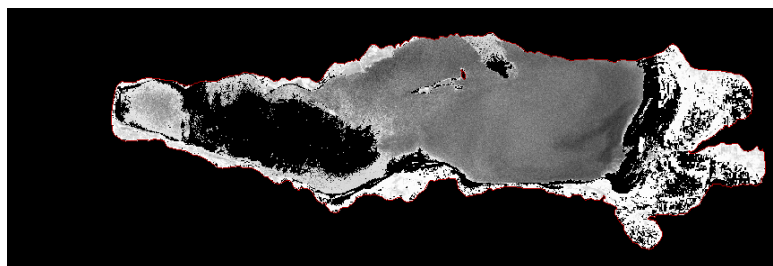


Figura 5.5 En tonos brillantes está representada la contribución de materiales suspendidos en el cuerpo de agua.

NOVIEMBRE 2002

El mapeo de pigmentos de clorofila se realizó con la obtención del cociente de bandas  $ETM4/ETM3$  cuyo resultado se muestra en la Figura 5.6

En la Figura 5.7 el cociente  $ETM3/ETM1$ , donde se presentan las principales características de reflectancia y absorbancia en materiales con contenidos de hierro (óxidos de hierro) muestra una fuerte contribución sobre el cuerpo de agua en su ribera sur y parte de la ciénega. Los sedimentos rojos en este cociente se observan en tonos grises

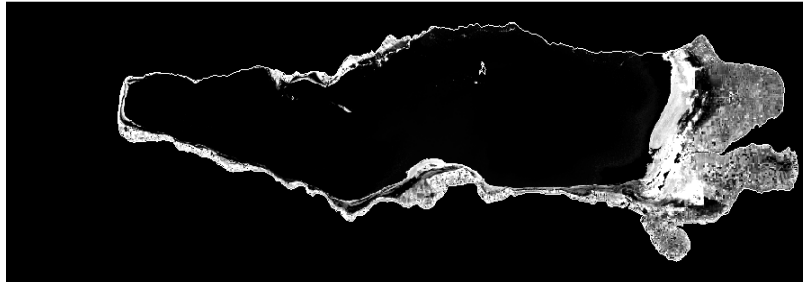


Figura 5.6 Resultado del cociente  $ETM4/ETM3$ . En tonos brillantes están representadas las zonas con pigmentos de clorofila.

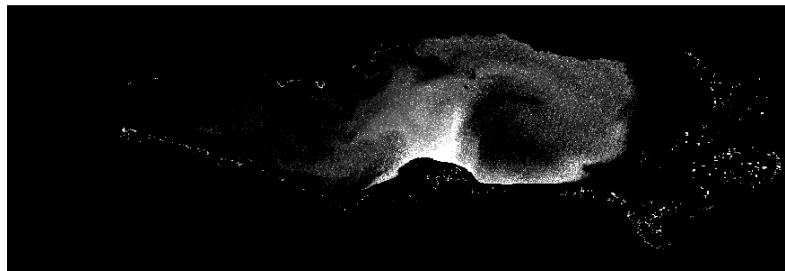


Figura 5.7. Resultado del cociente  $ETM3/ETM1$  propuesto para identificar sedimentos suspendidos provenientes de materiales en cuya estructura se encuentra el hierro. La contribución de dichos materiales se observa en tonos brillantes.

El cociente  $ETM3/ETM7$  se propone para identificar material suspendido proveniente de materiales de tipo arcilloso cuya característica de absorción se presenta en la banda  $ETM7$  con la finalidad de mapear la mayor parte de los sedimentos en suspensión presentes en el cuerpo de agua. El resultado se muestra en la Figura 5.8 donde los tonos brillantes muestran la contribución de este tipo de material.

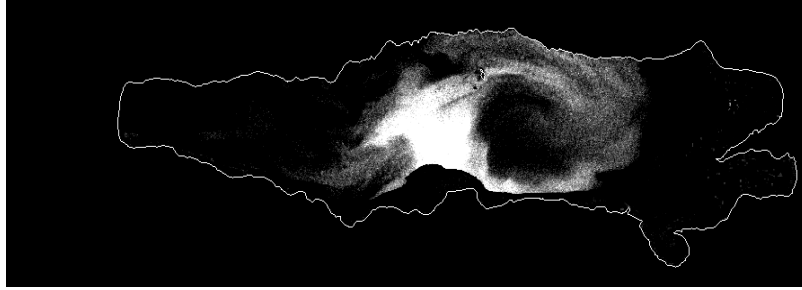


Figura 5.8 El cociente  $ETM3/ETM7$  muestra la presencia de material suspendido con características espectrales de absorción correspondientes a materiales arcillosos.

La contribución total de los sedimentos suspendidos en el cuerpo de agua se observa en el resultado de sumar los cocientes propuestos para mapear sedimentos suspendidos de diferentes orígenes ( $ETM3/ETM1$ ,  $ETM3/ETM7$ ), La figura 5.9 muestra en tonos brillantes las áreas cubiertas de material suspendido.

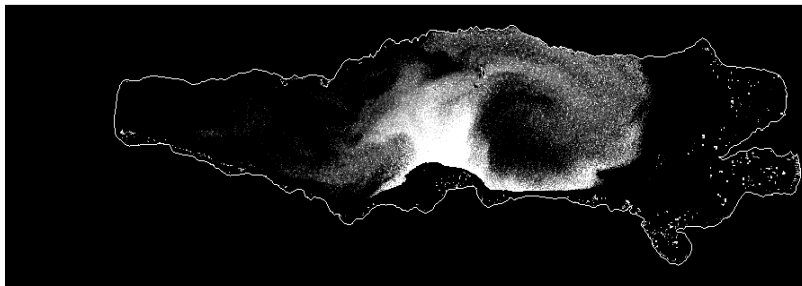


Figura 5.9 En tonos brillantes está representada la contribución de materiales suspendidos en el cuerpo de agua.

## 5.2.2 INDICE DE VEGETACION DIFERENCIAL NORMALIZADO (NDVI)

MAYO 2002

Para visualizar la presencia de vegetación acuática en el cuerpo de agua se aplicó NDVI a la escena, lo que indicará las zonas dominadas por vegetación acuática como lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), tule (*Typha latifolia*), entre otras especies de vegetación. El NDVI está basado en la firma espectral de la clorofila lo que tiene por consecuencia indicar zonas donde existen pigmentos de clorofila dentro del cuerpo de agua.

La Figura 5.10 muestra el NDVI obtenido de las bandas ETM3 y ETM4 de acuerdo a la respuesta espectral de la vegetación. El rango de valores del índice es de -1 a 1 donde -1 indica que no hay presencia de pigmentos de clorofila mientras que 1 indica la presencia de pigmentos de clorofila.



Figura 5.10 Índice de vegetación diferencial normalizado, donde -1 indica nula presencia de vegetación y 1 presencia de vegetación vigorosa. Los valores entre 0 y 1 indican presencia de pigmentos de clorofila. La zona enmarcada muestra la única zona donde existen píxeles donde el NDVI es -1

#### NOVIEMBRE 2002

El NDVI obtenido para el mes de noviembre de 2002 se despliega en la Figura 5.11 donde se observan grandes áreas con ausencia de pigmentos de clorofila. La zona oriental del cuerpo de agua muestra fuertes contribuciones de pigmentos de clorofila. La zona occidental tiene en su mayor parte valores cercanos a cero lo que indica que la reflectancia en las bandas ETM4 y ETM3 es similar lo que lleva a un valor de cero de NDVI. Las zonas con valores negativos se concentran en la parte central del cuerpo de agua.

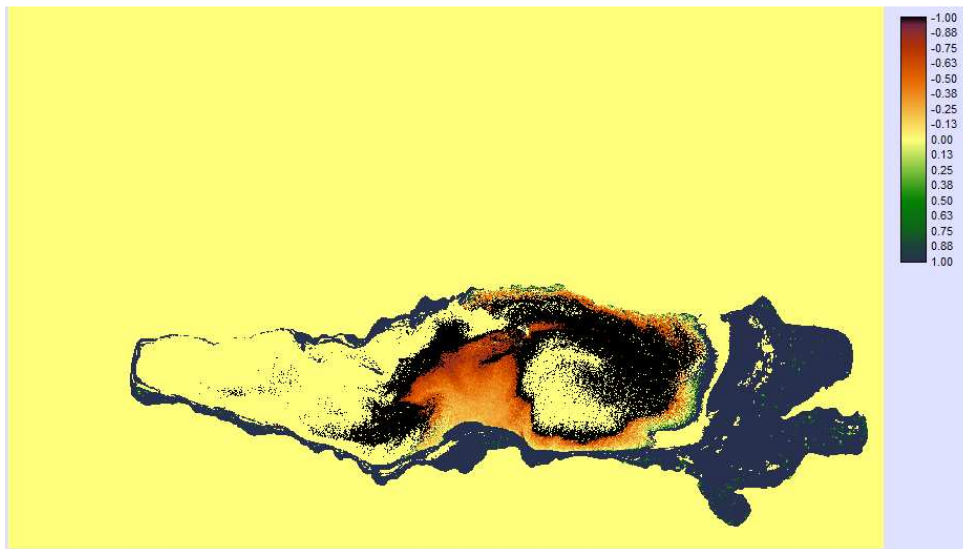


Figura 5.11 NDVI del mes de noviembre.

### 5.2.3 COMPOSICION A COLOR

MAYO 2002

Las bandas espectrales que contienen los rasgos característicos de alta reflectancia de los materiales de interés son ETM4 (pigmentos de clorofila), y ETM3 (sedimentos suspendidos). Estas bandas se encuentran en la región del IRC por lo que se propone una composición en falso color en el sistema RGB-431 que se muestra en la Figura 5.12

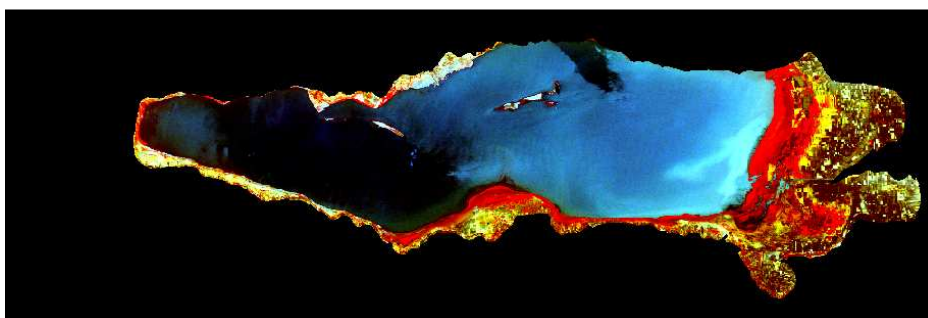


Figura 5.12 Composición en falso color RGB-431. En tonos de rojo se visualiza vegetación.

La composición 431 despliega en tonos de rojo la contribución de vegetación visualizado como pigmentos de clorofila, la parte occidental del lago presenta contribuciones de pigmentos de clorofila, la baja intensidad indica que las concentraciones son menores que en la parte oriente del

cuerpo de agua. Los tonos de amarillo son resultado de la contribución de vegetación más sedimentos y/o suelo con contenidos de hierro. Los tonos marrones son debidos a vegetación estresada por lo que se asume que la zona con estos tonos son zonas desecadas del lago. Los colores azulados presentan una contribución de sedimentos y vegetación siendo la zona más brillante (azul-verdoso) la que supera en contribución de sedimentos a la contribución de pigmentos de clorofila. Las zonas oscuras presentan mínima contribución de pigmentos de clorofila y sedimentos en general.

NOVIEMBRE 2002

En la Figura 5.13 se muestra la composición en falso color RGB-431 que muestra fuertes contribuciones de pigmentos de clorofila en las riberas del cuerpo de agua, así como en la parte oriental del mismo. En la zona marcada por el recuadro se observan tonos verdes que indican fuertes contribuciones de sedimentos suspendidos. Los tonos azules muestran una mínima reflectancia de material suspendido en el cuerpo de agua, en la banda ETM1 los tonos verdes azulados muestran mayores contribuciones de éste material.

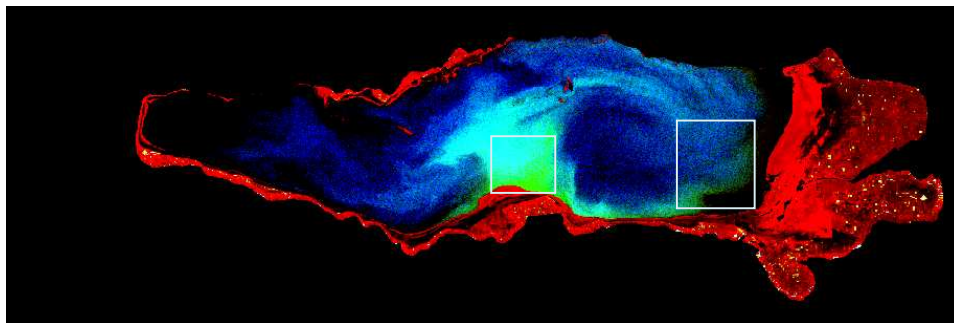


Figura 5.13 Composición en falso color RGB-431 del mes de noviembre 2002. Enmarcados se encuentran las más fuertes contribuciones de sedimentos rojos.

#### 5.2.4 TÉCNICA DE CROSTA O ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ORIENTADAS (ACPO)

Permite seleccionar las bandas espectrales que contienen la mayor información de los materiales de interés contenidos en el área de estudio.

El PCA se aplicó para las seis bandas del sensor ETM+ no térmicas (la pancromática no es de interés para el presente estudio). El análisis estadístico se muestra en la Tabla 5.7 en donde se ve que la mayor varianza de los datos se encuentra en la primera componente y disminuye hacia las



últimas componentes. En la primera componente se encuentra la información que es común en las 6 bandas ETM, es decir, la topografía y el albedo. Para la información de vegetación obtenida a partir de la banda ETM4 la componente PC3 es la que tiene una mayor información sobre esta banda. Para el caso de sedimentos suspendidos ninguna componente proporcionó información útil para el caso de estudio.

Para el mapeo de pigmentos de clorofila y sedimentos suspendidos se seleccionaron las bandas ETM2, ETM3, ETM4 y ETM5, se eliminó la banda ETM1 porque es la más influenciada por el efecto atmosférico y la 7 debido a que es donde las propiedades ópticas del agua se ven fuertemente influenciadas por la gran absorción que presenta en la región del IRM. El análisis estadístico resumido en la Tabla 5.8 muestra la información obtenida para el mes de mayo. Se observa que el material que puede mapearse con el resultado del análisis estadístico son los pigmentos de clorofila, por lo que ACPO con 4 bandas no proporciona un mejor realce que ACPO con seis bandas como se muestra en la Tabla 5.8

Tabla 5.7 Análisis de componentes principales de 6 bandas ETM del área del lago de Chapala. Eigenvalores y matriz de cargas.

COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% var.	92.919616	4.092845	2.278257	0.571798	0.121494	0.015995
eigenval.	1505.86831	66.329222	36.921753	9.266642	1.968951	0.25921
LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
20020503_b10	0.399018	0.849827	0.177622	0.174462	0.216224	0.099449
20020503_b20	0.494965	0.824675	0.175302	0.038131	0.18795	-0.085749
20020503_b30	0.730577	0.655654	0.109433	-0.137765	-0.073482	0.004021
20020503_b40	0.926689	-0.112593	0.354451	0.053044	-0.011071	-0.000759
20020503_b50	0.994342	-0.078626	-0.031335	-0.062415	0.014941	0.001118
20020503_b70	0.988344	0.05988	-0.111305	0.083682	-0.014038	-0.001375

Tabla 5.8 Análisis de componentes principales orientadas con cuatro bandas.

COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4
% var.	92.144944	5.071449	2.640588	0.143013
eigenval.	996.722705	54.85736	28.562978	1.546962
LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4
20020503_b20	0.472215	0.837025	0.087395	0.262226
20020503_b30	0.715661	0.695375	-0.01176	-0.064381
20020503_b40	0.946031	-0.054667	0.319416	-0.003489
20020503_b50	0.99491	-0.048724	-0.08814	0.003196

#### NOVIEMBRE 2002

El análisis de PCA que se muestra en la Tabla 5.9 muestra que la PC1 contiene el 92.23% de la varianza total de los datos, presenta altas cargas de información contenida en la región del IR y contiene toda la información de topografía. En la PC2 con el 5% de la varianza total de los datos, la banda ETM4 es la mayor aportadora de información por lo que en ella se mapea la información de pigmentos de clorofila en el cuerpo de agua. La PC3 contiene la información de la región del visible. La PC4 con el 46% de la varianza total de los datos tiene una fuerte contribución de la banda ETM3 que contiene la información de sedimentos suspendidos provenientes de materiales con contenidos de hierro, ver Figura 5.17. La PC5 y PC6 contienen la mínima varianza de la totalidad de los datos por lo que la información contenida es mínima o nula.

Tabla 5.9 Análisis de componentes principales con seis bandas no térmicas del sensor ETM (noviembre, 2002)

COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% var.	92.237895	5.625079	1.57633	0.464973	0.075671	0.020049
eigenval.	416.957141	25.42791	7.125726	2.101887	0.342066	0.090631
LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
20021111_b10	0.011886	-0.147695	0.78105	0.193528	0.549137	-0.171707
20021111_b20	0.024126	-0.110462	0.813081	0.399586	0.275506	0.300246
20021111_b30	0.065782	-0.068558	0.781283	0.603267	-0.125038	-0.03122
20021111_b40	0.879175	0.473232	0.052896	-0.017402	-0.000912	0.000004
20021111_b50	0.9936	-0.060611	-0.087817	0.036911	0.003573	-0.000059
20021111_b70	0.970665	-0.190865	0.132854	-0.060734	-0.006137	0.000134

MAYO 2002

En la Figura 5.14 se muestra la componente principal 3 (PC3) obtenida de la aplicación de la técnica de Crosta con cuatro bandas que contiene la mayor información de pigmentos de clorofila.

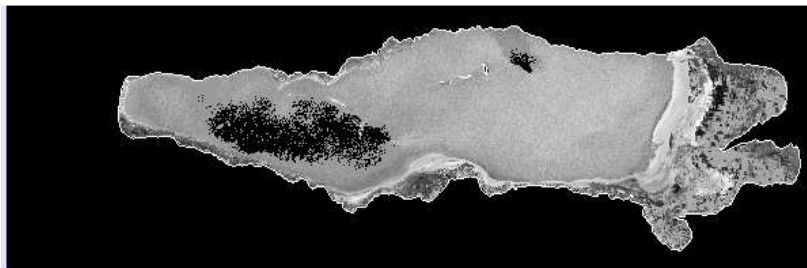


Figura 5.14. Componente principal PC3. En tonos brillantes se observa la contribución de clorofila en el lago de Chapala

NOVIEMBRE 2002

En las figuras 5.15 y 5.16 se muestran los resultados de la técnica de Crosta para seis y cuatro bandas

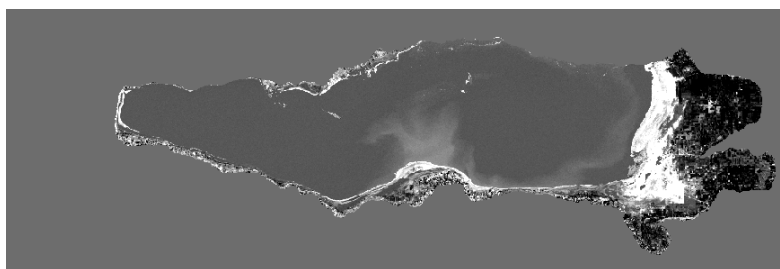


Figura 5.15 Componente principal 2 que muestra los pigmentos de clorofila en tonos brillantes.

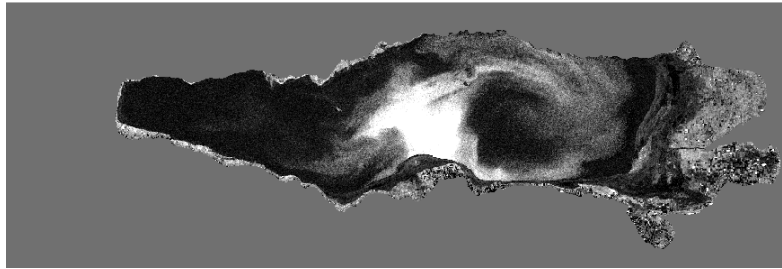


Figura 5.16 Componente principal 4, proporciona información de sedimentos suspendidos

En las dos fechas de estudio los píxeles oscuros se determinaron en la región del IR donde el efecto atmosférico es mínimo.

### 5.3 REALCE ESPACIAL

#### 5.3.1 DELIMITACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

Un realce de gradiente direccional con orientaciones E-W y N-S, se propuso para el realce de bordes del lago de Chapala. Estas máscaras se proponen dada la orientación preferencial que presenta el cuerpo en estudio: Este –Oeste. Se suman gradientes NE y SW para mejorar la obtención de bordes. En virtud de la complejidad de la respuesta espectral que presenta el cuerpo de agua en estudio por las altas cargas de sedimentos en superficie, las áreas cubiertas con pigmentos de clorofila y zonas de cultivo en la parte Este de lago, se requiere de un detallado criterio para la obtención del área que ocupa el cuerpo de agua. En la Figura 5.17 se muestra el resultado de sumar la información que arrojaron las aplicaciones de las diferentes máscaras de gradiente direccional. Para los bordes Oeste y Sur la aplicación de las máscaras de gradiente direccional fue satisfactoria. Para el caso del borde norte del lago, sus límites coinciden con los datos vectoriales de hidrología superficial, lo que resuelve el débil resultado de la aplicación de máscaras.

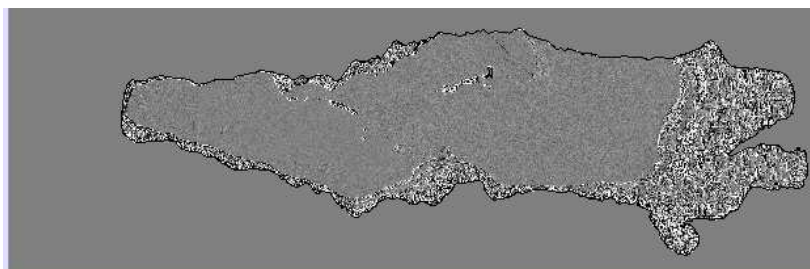


Figura 5.17 Resultado de aplicar realce espacial.

En la parte Este del lago de Chapala se encuentra el área denominada Ciénega de Chapala además de ser la parte por donde el principal afluente del lago, el río Lerma, desemboca. Ambos factores contribuyen a la complejidad (Figura 5.18) que presenta el bordo Este del cuerpo de agua ya que la aplicación de la técnica de gradientes direccionales no permitió la identificación de los límites en esta zona. Por esta razón se propuso aplicar la técnica descrita en Campbell (2002), donde se propone delinear áreas inundadas a través del uso de las regiones espectrales del 0.5- 0.6  $\mu\text{m}$  (ETM2) por las fuertes contribuciones de sedimentos en suspensión y la región del IRC e IRM (ETM5 ó ETM7) por la alta absorbancia que presentan los cuerpos de agua. La técnica compara los BV entre IR y el visible (0.5-0.6  $\mu\text{m}$ ) de dos diferentes fechas.

$$\frac{ETM2(\text{sin inundar}) - ETM 5 \text{ ó } ETM7(\text{inundado} \text{ ó } \text{sin inundar})}{ETM2(\text{sin inundar})}$$

Esta relación se basa en considerar que la respuesta espectral del suelo es similar en la región del visible (ETM2) y en la región del IR (ETM5 ó ETM7) por lo que en el caso de que un determinado píxel corresponda a suelo seco, la relación propuesta resulta en cero, mientras que si se trata de una zona inundada el cociente será uno. Por ejemplo, si la tierra seca tiene valores cercanos a 35 en ambas bandas, entonces para áreas inundadas la relación es  $(35-0)/35=1$  y para áreas sin inundar  $(35-35)/35=0$ .

El principal problema que se presenta en esta técnica es cuando la alta concentración de sedimentos no permite que haya un contraste entre ambas regiones espectrales de tal forma que la técnica permita la separación de áreas inundadas de no inundadas. El resultado del análisis de la técnica aplicada se muestra en la Figura 5.19 como una reclasificación de la información. (Se consideraron ambas fechas: mayo y noviembre).

Finalmente se consideró el análisis a detalle de la zona de interés, es decir el bordo Este mostrado en la Figura 5.20

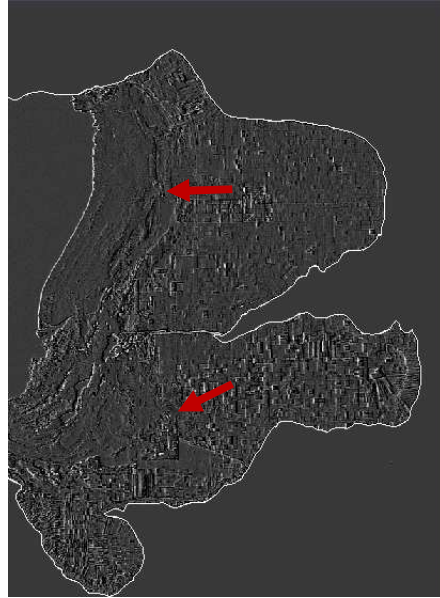


Figura 5.18 Detalle del borde Este del lago de Chapala. Las flechas señalan las áreas con difícil identificación de bordes.

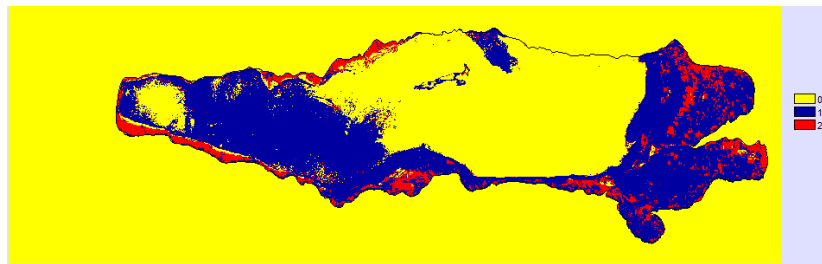


Figura 5.19 Resultado del análisis de la técnica descrita en Campbell (2002).

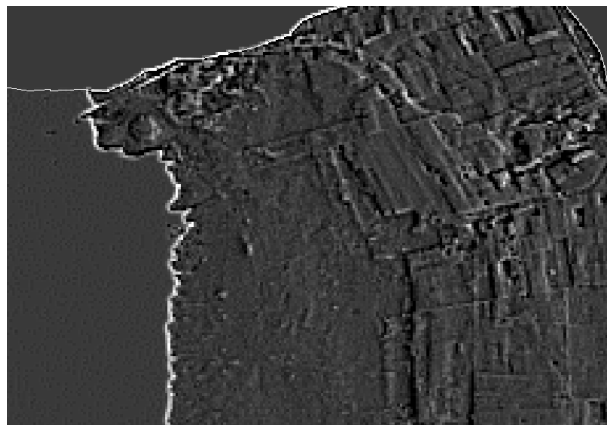


Figura 5.20 Detalle de la zona de Este del lago Chapala. Se observan límites definidos, característicos de zonas de cultivo.

El resultado de aplicar la técnica para delimitar cuerpos de agua con áreas inundadas y no inundadas, descrita en Campbell (2002), agregada a un análisis visual de las formas geométricas en el área ubicada al Este y que corresponde a la ciénega de Chapala, así como la aplicación de filtros de gradiente diferencial se muestra en la figura 5.21, donde los polígonos en color rosa corresponden al cuerpo de agua.

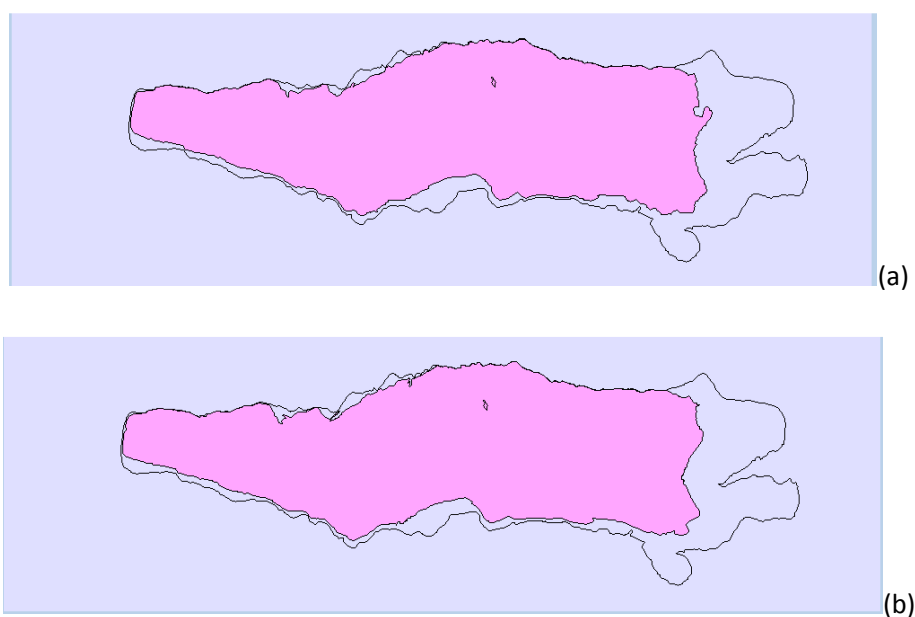


Figura 5.21 Polígonos que delimitan en color rosa el cuerpo de agua, (a) mayo, (b) noviembre.

Las áreas obtenidas a partir de la delimitación del cuerpo de agua son las siguientes:

MAYO 2002

COBERTURA	ÁREA Km <sup>2</sup>
No Dato	4332.82
Cuerpo de agua	846.99

NOVIEMBRE 2002

COBERTURA	ÁREA Km <sup>2</sup>
No Dato	4331.53
Cuerpo de agua	848.28

#### 5.4 CLASIFICACION SUPERVISADA.

Para la extracción de información temática se realizaron polígonos de entrenamiento para las fechas en estudio, mayo y noviembre, con base en la identificación de los diferentes materiales que dominan la respuesta espectral del lago de Chapala. Las firmas espectrales obtenidas tras la creación de los polígonos de entrenamiento se presentan a continuación. En la Figura 5.23 y 5.22 se muestran las firmas espectrales obtenidas de la identificación de 4 y 3 clases respectivamente:

Agua baja turbidez

- a) Pigmentos de clorofilas
- b) Sedimentos suspendidos
- c) Sedimentos alta absorbanza IR

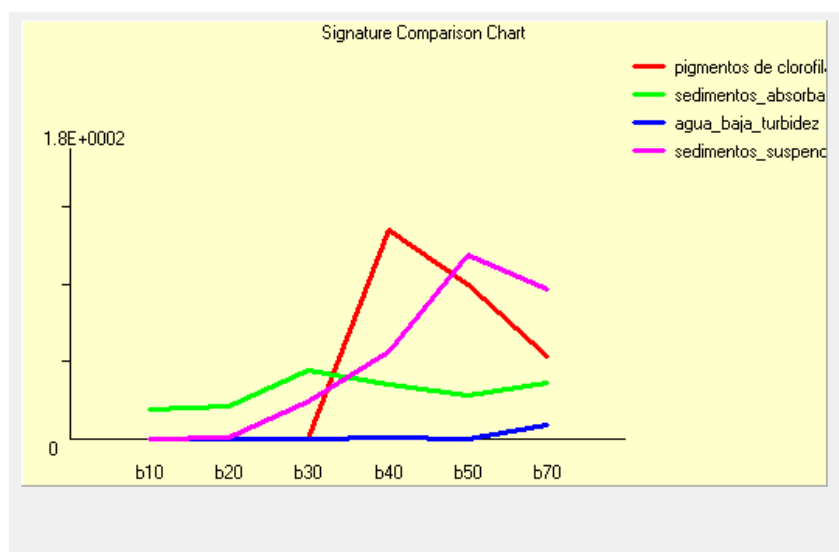




Figura 5.22 Firmas espectrales que caracterizan las tres clases que se identificaron para el mes de mayo.

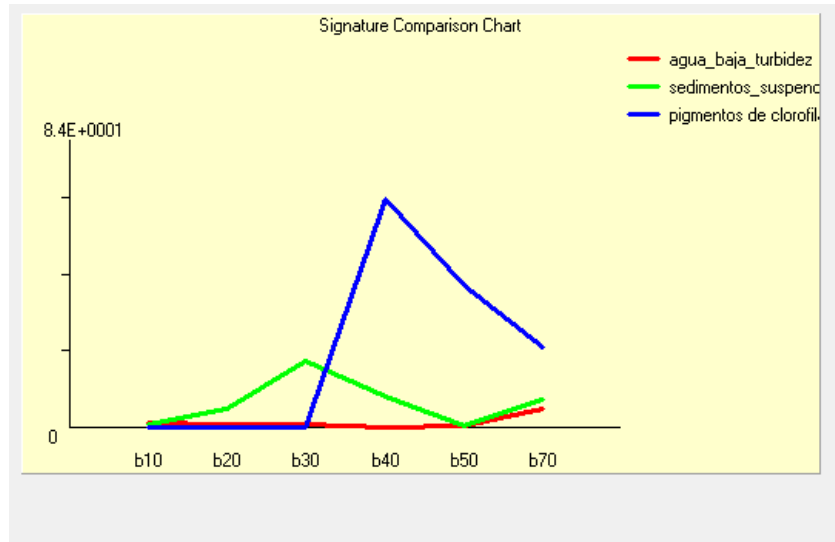


Figura 5.23 Firmas espectrales que caracterizan las tres clases que se identificaron para el mes de noviembre

Se utilizó un clasificador de máxima probabilidad ya que este considera la media, desviación estándar y la probabilidad de que ese píxel pertenezca a cierta clase. Cada píxel en la imagen fue clasificado dentro de una de las clases identificadas.

Los polígonos de entrenamiento obtenidos de la identificación con base en firmas espectrales teóricas contienen características espectrales que a su vez fueron los datos de entrada para el proceso de clasificación de máxima probabilidad y mínima distancia. Las imágenes obtenidas tras el proceso se despliegan en las Figuras 5.24 y 5.25 para los meses de mayo y noviembre de 2002 respectivamente.

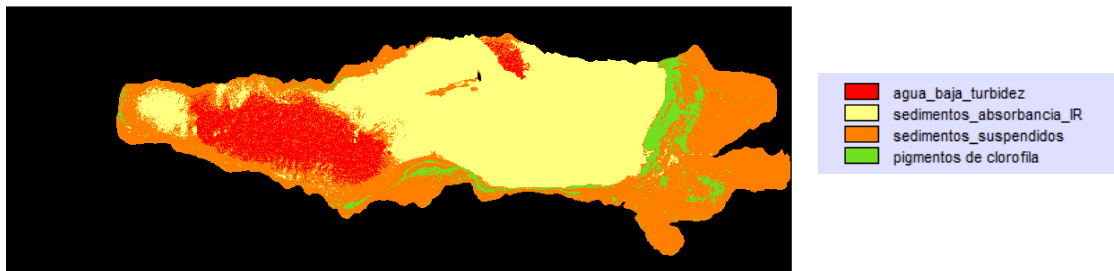


Figura 5.24 Mapa temático de materiales que dominan la respuesta espectral en el lago de Chapala para el mes de mayo de 2002

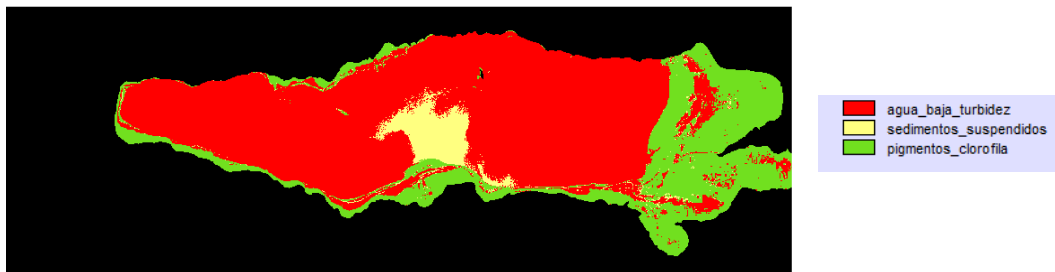


Figura 5.25 Mapa temático de materiales que dominan la respuesta espectral en el lago de Chapala para el mes de noviembre de 2002

Aplicando la máscara que delimita el cuerpo de agua, permitió la obtención de áreas que ocupa cada material identificado en la superficie del Lago de Chapala. En la Figura 2.26 se despliega la información temática aplicando la máscara obtenida para la delimitación del cuerpo de agua.

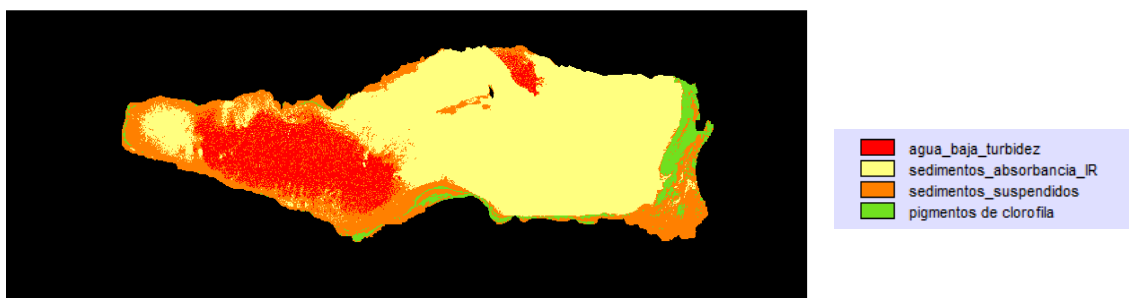


Figura 5.26 Información temática aplicando la máscara obtenida para delimitar el cuerpo de agua en mayo

Áreas obtenidas para las diferentes clases identificadas en el mes de Mayo

CLASE	ÁREA Km <sup>2</sup>
agua_baja_turbidez	121.3038
sedimentos_absorbancia_IR	489.4281
sedimentos suspendidos	198.9963
pigmentos de clorofila	36.7155

La Figura 5.27 muestra el mapa temático de la distribución de materiales identificados en el mes de noviembre aplicando la máscara que delimita el cuerpo de agua.

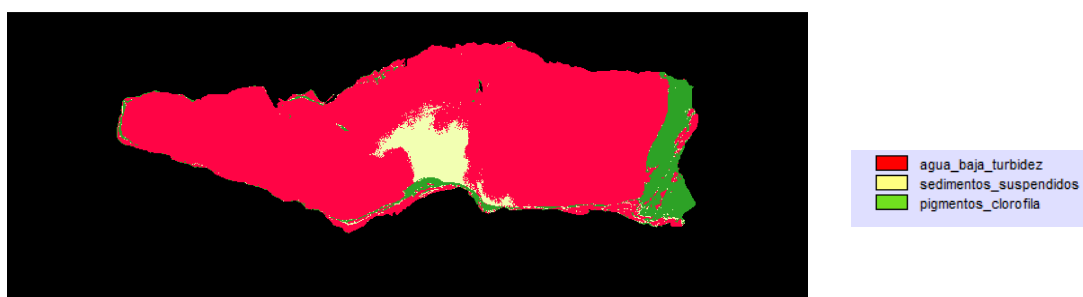


Figura 5.27 Información temática aplicando la máscara obtenida para delimitar el cuerpo de agua en noviembre.

Áreas obtenidas para las diferentes clases identificadas en el mes de Noviembre

CLASE	ÁREA Km <sup>2</sup>
agua_baja_turbidez	721.2
sedimentos suspendidos	57.74
pigmentos de clorofila	68.98

## 5.5 ESTUDIO DE CAMBIO DE LOS MATERIALES IDENTIFICADOS EN EL LAGO DE CHAPALA DE MAYO A NOVIEMBRE 2002.

Una vez obtenidas las clasificaciones para las fechas en estudio se tiene material suficiente para evaluar el cambio de los materiales identificados en la superficie del lago de Chapala del mes de mayo a noviembre del mismo año. La obtención de dichos patrones se realizó mediante un análisis de sustracción. El código de colores utilizado para el análisis de cambio de mayo a noviembre es el siguiente:

- Negro presencia del material en mes de noviembre e inexistencia en mayo
- Amarillo paja presencia del material en ambas fechas.
- Magenta ausencia del material en el mes de noviembre y presencia en el mes de mayo

Por lo tanto el análisis de cambio indicará existencia, inexistencia o permanencia del material sobre el cuerpo de agua.

Para el material identificado como agua con baja turbidez (mínima presencia de material suspendido), el análisis de cambio indicó que las zonas en color negro fueron zonas donde en el mes de mayo no había presencia de agua con baja turbidez y en el mes de noviembre el material es detectable, mientras que, las zonas en color amarillo demuestran que en ambas fechas estas zonas presentaron baja turbidez en el cuerpo de agua, esto es que las zonas en color amarillo son zonas que en ambas fechas se encontró agua con baja turbidez. El resultado obtenido se observa en la Figura 5.28

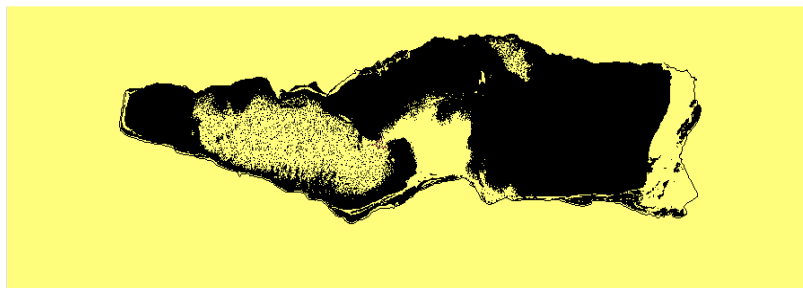


Figura 5.28 En color negro se observan las zonas donde la concentración de sedimentos suspendidos en mayo no existía y en noviembre se detectaron.

En el caso de sedimentos suspendidos la Figura 5.29 muestra el resultado del cambio del mes de mayo a noviembre. La escena está dominada por el color magenta que tras el análisis de sustracción indica que en mayo estas zonas presentaron contenido de sedimentos suspendidos mientras que para el mes de noviembre espectralmente no se encontró presencia de sedimentos suspendidos. Las zonas en color amarillo indican que en ambas fechas estas zonas presentaron contenidos de sedimentos suspendidos, es decir no hubo variación.

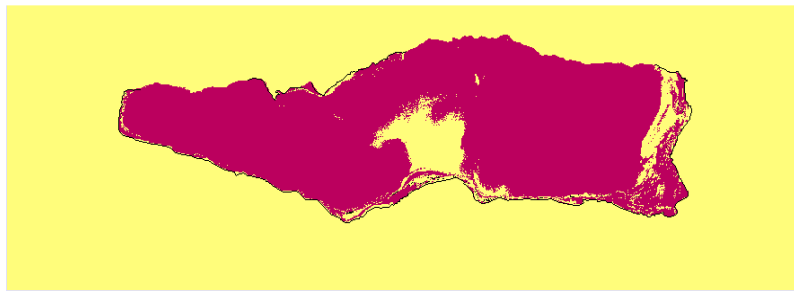


Figura 5.29 El color magenta indica las zonas en donde la concentración de sedimentos suspendidos en el cuerpo de agua en mayo se determinó presencia de este material y en noviembre las zonas muestran inexistencia de sedimentos suspendidos.

El análisis realizado para las zonas que presentan contenidos de clorofila (biomasa) y cuyo resultado se presenta en la Figura 5.30 donde en color amarillo se indica que del mes de mayo a noviembre las zonas con contenidos de biomasa siguieron presentando algún contenido de este material de una fecha a otra. El color negro indica que en estas zonas, en el mes de mayo no se detectó presencia de biomasa mientras que en el mes de noviembre se detectó algún contenido de biomasa. En el caso de las zonas en color magenta, el análisis indica que en mayo estas zonas presentaron contenidos de clorofila y en noviembre estas zonas presentaron ausencia de biomasa.

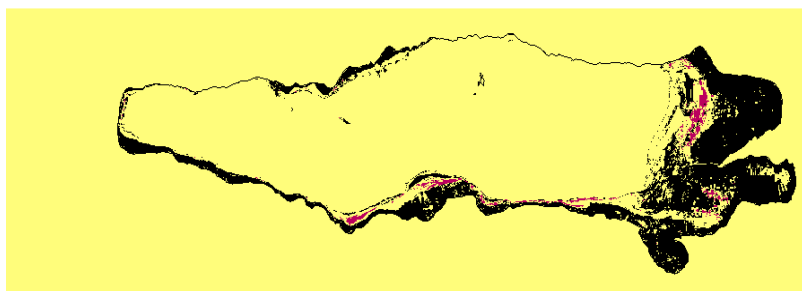


Figura 5.30 Muestra el comportamiento de zonas con contenido de clorofila del mes de mayo a noviembre. Las zonas representadas en amarillo son zonas que no mostraron cambios de contenidos de biomasa, el magenta muestra zonas

donde en mayo no existía presencia de biomasa y en noviembre sí. El color negro indica las zonas que en mayo no presentaron biomasa y en noviembre sí.

#### 5.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE NDVI CON PTOT

Para verificar que la información obtenida aplicando diversas metodologías de percepción remota es confiable, se utilizaron los datos proporcionados por la Red Nacional de Monitoreo en el Organismo Chapala-Santiago-Pacífico recabados de muestreos *in situ* en el año 2002. La verificación se realizó de manera cualitativa con base en las curvas de crecimiento de biomasa en relación a la disposición de nutrientes.

En la Figura 5.31 y 5.32 se muestran los mapas de NDVI y fósforo total (*in situ*) obtenidos para el análisis de resultados con percepción remota.

# ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

## LAGO CHAPALA

☆ MANANTIALES\_HIDROTERMALES

mayo\_2002\*

P\_TOT\_mg\_l

- 0.49
- 0.491 - 0.64
- 0.641 - 0.79
- 0.791 - 0.94
- 0.941 - 1.09
- 1.091 - 1.24
- 1.241 - 1.39
- 1.391 - 1.54
- 1.541 - 1.69
- 1.691 - 1.74

NDVI

Value  
 High : 1  
 Low : -1

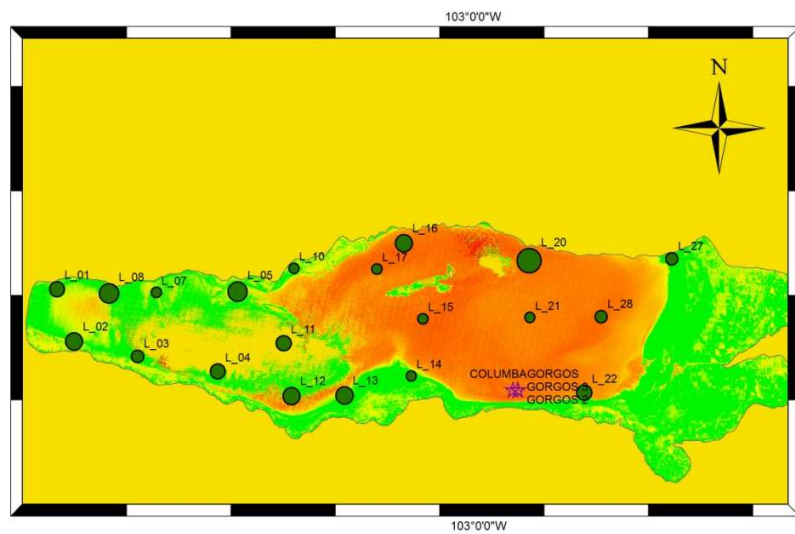
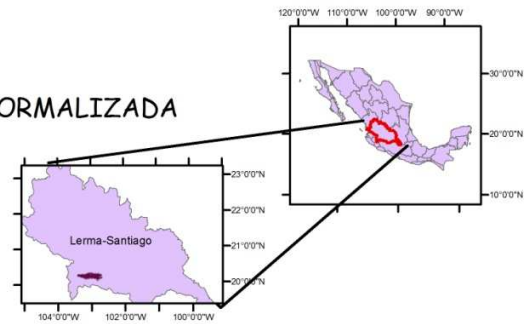


Figura 5.31 Mapa NDVI - P<sub>TOT</sub> obtenido para el mes de mayo en el lago de Chapala

# INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

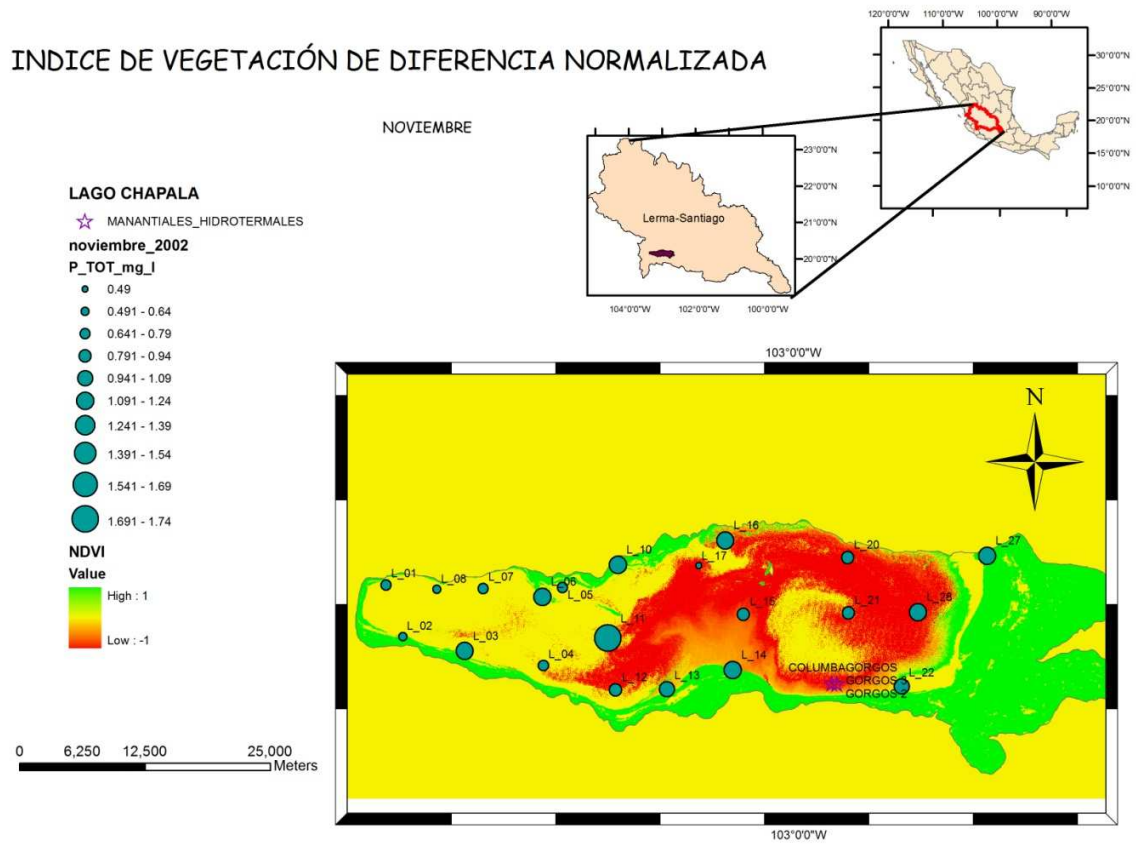


Figura 5.32 Mapa NDVI - P<sub>TOT</sub> obtenido para el mes de noviembre en el lago de Chapala



## 6. DISCUSION DE RESULTADOS

A partir del procesamiento de imágenes satelitales se obtuvieron resultados sobre:

- Identificación de materiales que controlan la respuesta espectral del Lago de Chapala
  - Pigmentos de clorofila
  - Sedimentos suspendidos
  - Agua con baja turbidez
- Delimitación del cuerpo de agua
- Estudio de cambio de los materiales identificados de mayo a noviembre del año analizado
- Mapas temáticos de los materiales que forman parte del ecosistema del lago de Chapala
- Áreas que ocupa cada material identificado sobre la superficie del lago de Chapala en cada fecha de estudio.
- Inferencia de los resultados obtenidos de la aplicación de técnicas de percepción remota con la información in situ proporcionada por la RNM (CONAGUA, 2002).

El éxito de los resultados del procesamiento de imágenes satelitales se basa en una buena corrección atmosférica, también llamada preprocesamiento. Si la corrección atmosférica no es aplicada correctamente se tiene el riesgo de que se enmascaren o se pierdan las respuestas espectrales de los materiales que desean identificarse.

Por lo cual un análisis estadístico y visual permitió aplicar el método de corrección atmosférica que considerara una selección de áreas relativamente limpias que indicaron áreas de agua espectralmente limpia. Al aplicarse el método descrito para extracción de píxel negro se encontraron valores anómalos que enmascararon el valor real del efecto atmosférico. La solución al problema se encontró en un análisis a detalle de dichos valores anómalos que fueron excluidos por ser mínimos y máximos.

El preprocesamiento es inherente a la evaluación de áreas del agua espectralmente más limpia, y se obtuvo que: en mayo, las áreas con este material fueron menores que en noviembre, en cuya fecha se localizaron grandes áreas con una respuesta espectral semejante al agua limpia. La aplicación de este método implica la consideración de una atmósfera homogénea.

El análisis estadístico indica que para los datos de mayo de 2002 se tiene que la banda espectral ETM5 presenta la mayor varianza, lo que indica que en dicha banda espectral se encuentra una gran cantidad de información. Una varianza grande se debe a las diferencias espectrales de los

distintos materiales que conforman la escena. En el caso de la correlación, las bandas espectrales que abarcan el IRC y IRM presentan una alta correlación lo que indica que la información contenida en ETM5 y ETM7 es redundante. Lo mismo sucede con ETM4 y ETM5. Para el caso de la región del espectro EM visible las bandas ETM1 y ETM2, así como ETM2 y ETM3 presentan alta correlación. Ver Tabla 4.6

Respecto al mes de noviembre la banda ETM5 es donde se encuentra una gran cantidad de información debido a que en ella es donde la varianza de los datos tiene el mayor valor de todas las bandas analizadas. Las bandas ETM5 y ETM7 y las bandas de la región del visible están fuertemente correlacionadas.

Una correlación alta indica que se tiene una gran cantidad de datos redundantes, mientras que una baja correlación sugiere que cada banda proporciona información que no se encuentra en la otra banda.

Realizado el preprocesamiento se tiene información en BV (0-255) que permite, durante el procesamiento de las imágenes, visualizar en tonos brillantes u oscuros la presencia o ausencia de materiales de interés. En el lago de Chapala uno de los principales problemas es el crecimiento incontrolable de lirio acuático y vegetación de raíz acuática, así como alta turbidez debida a materiales acarreados por el principal afluente del lago; el río Lerma. El río Lerma atraviesa toda la cuenca, lo que implica el acarreo de fuertes cantidades de material de tamaño limo y arena fina así como de materia orgánica que es vertida de manera natural o por actividades humanas. Con ello el primer problema con el que este estudio se enfrentó fue la presencia de materia orgánica que absorbe la energía electromagnética proveniente del sol en la región del visible, por lo que en algunos casos se prescindió de la banda ETM1 por ser la región donde se encuentra la mayor ventana de absorción y por ser la más influenciada en el efecto atmosférico. El propio cuerpo de agua presentó el mismo problema en la región del infrarrojo medio donde se presenta una fuerte absorbancia y transmitancia, con lo cual se reduce la región del espectro EM que presenta altas reflectancias para los materiales de interés. Se sugirió la suma de los cocientes propuestos para sedimentos en suspensión ( $ETM3/ETM1$ ,  $ETM3/ETM7$ ), ya que en un cuerpo de agua donde las características físicas del lugar promueven una constante resuspensión y acumulación de material suspendido transportado promueven también la mezcla de materiales en el cuerpo de agua.

Se requirió del análisis de todos los cocientes propuestos para la identificación de los materiales de interés (basados en la Tabla 4.9), la sustracción entre bandas donde los cocientes no

proporcionaron información y se apoyó el presente estudio en la obtención de componentes principales a través de la aplicación de la técnica de Crosta para confirmar la identificación de materiales.

Las composiciones a color permitieron una buena identificación de los materiales buscados, estas composiciones en falso color otorgaron una confirmación de la distribución espacial de los materiales estudiados. Este método proporcionó información adicional en el mes de noviembre sobre el cuerpo de agua debido a que con la composición en falso color se visualiza la dinámica eólica que predomina en el lago de Chapala y que promueve la resuspensión de sedimentos. Además explica la concentración de pigmentos de clorofila en las orillas y extremos del lago de Chapala

Respecto al índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) resultó ser el método que mejor permitiera un análisis detallado del comportamiento de pigmentos de clorofila en superficie, ya que el rango de valores del índice es de -1 a 1 donde -1 indica que no hay presencia de pigmentos de clorofila mientras que 1 indica la presencia de pigmentos de clorofila asociada a vegetación vigorosa. Los valores entre 0 y 1 indican la presencia de clorofila debido a que la diferencia  $ETM4-ETM3$  proporciona valores positivos, lo que corresponde a que el contraste entre la meseta del IRC y la región del rojo coinciden con la respuesta de pigmentos de clorofila. Para el caso de valores negativos del NDVI, se tiene que se ha perdido la alta reflectancia de la meseta del infrarrojo y que la absorbancia de la región del visible disminuye por lo que para los valores cercanos a cero, con base en la respuesta espectral de la vegetación, se tiene que la estructura del material que contiene pigmentos de clorofila se ha modificado, pero que todavía existe presencia de clorofila. Sin embargo para valores cercanos a -1 la presencia de pigmentos de clorofila es insignificante.

En este punto del estudio se han identificado, con base en la respuesta espectral teórica de los materiales, las áreas donde se encuentran las más fuertes concentraciones de los materiales analizados: agua limpia, clorofila y sedimentos. Un análisis visual de las composiciones en falso color, el algebra de bandas espectrales y el cálculo del NDVI indican que el área que INEGI determina como cuerpo perenne muestra zonas desecadas que son utilizadas como campos de cultivo. El razonamiento que lleva a la anterior aseveración se basa en el estudio de los bordes presentes en el área del lago de Chapala, para lo cual se aplicaron técnicas de realce espacial que proporcionaron una visualización que si bien no permitió una exactitud en la delimitación del

cuerpo, si definió a groso modo los límites del cuerpo de agua y las formas geométricas características de zonas de cultivo.

Debido a la variedad de materiales suspendidos en el lago de Chapala no fue posible, a través de reclasificación, delimitar el área que ocupa el cuerpo de agua. La delimitación se realizó digitalizando manualmente los bordes obtenidos del realce espacial y aplicando los criterios de formas y la técnica para delimitar cuerpos de agua con zonas inundadas y no inundadas en diferentes fechas.

El proceso de clasificación, basado en los polígonos de entrenamiento, generó mapas con información sobre la distribución de los materiales identificados, lo que llevo a la obtención de las áreas en las que estaban distribuidos dentro del cuerpo de agua. Es aquí donde un error de más de 2 km<sup>2</sup> indica la falta de exactitud al digitalizar manualmente.

Finalmente con dos fechas analizadas para un mismo lugar, se propuso el análisis de cambio en el cuerpo de agua para los 3 materiales identificados, obteniéndose en general que para el agua espectralmente más limpia del mes de noviembre este material es el que domina la respuesta espectral del cuerpo de agua mientras que en mayo las zonas de agua con baja turbidez fueron mínimas. Este comportamiento está relacionado con la temporada de lluvias. Las respuestas espectrales para ambas fechas indicaron que respecto a los pigmentos de clorofila (biomasa), el lago de Chapala presento algún contenido de clorofila. Cabe recordar que el análisis de cambio tomó criterios de ausencia, presencia y permanencia del material, es decir es un análisis cualitativo.

La verificación del trabajo de procesamiento de imágenes se realizó con el análisis cualitativo de los pigmentos de clorofila que están contenidos en algas acuáticas, vegetación de raíz acuática y fitoplancton, que aún cuando es de tamaño microscópico se ha probado que son detectables en imágenes Landsat (Allee & Johnson 1999; Giardino et al. 2001; Hunter et al. 2010; Tyler et al. 2006). Los pigmentos de clorofila que se traducen en presencia de biomasa, presentan una relación estrecha con los nutrientes disponibles en el cuerpo de agua.

Para el caso de mayo, el NDVI muestra fuertes concentraciones de biomasa, representadas por contenidos de clorofila, que son fácilmente visualizados en el mapa temático de NDVI. La información vertida de este mapa indica que donde las concentraciones de biomasa son mayores existe disponibilidad del nutriente limitante en el lago de Chapala: fósforo total. En el caso del punto de muestreo L\_20 la fuerte concentración de fósforo total puede atribuirse a descargas de agua producto de actividades humanas por la ubicación del punto de muestreo. Con respecto al

mes de noviembre las concentraciones de biomasa (clorofila) se localizan en los bordes del cuerpo de agua y las concentraciones de fósforo total son bajas, lo que coincide en el análisis de disponibilidad nutrientes para el crecimiento de biomasa, es decir que para el mes de noviembre al ser menores las concentraciones de fósforo el crecimiento de biomasa es menor de acuerdo a la información vertida del mapa temático.

Analizando la información que proporcionan ambas fechas en los mapas desplegados se observa que hay un florecimiento de biomasa en el mes de mayo y una decadencia en el mes de noviembre, que coincide con la disponibilidad del nutriente limitante. Adicionalmente este mapa proporciona información sobre la distribución de las áreas con biomasa y que por los patrones claramente visibles que se forman en dicha distribución debido a la dinámica de los vientos, se puede inferir que esta dinámica juega un papel importante en la distribución de concentraciones de biomasa en el lago de Chapala.

Es posible observar que los mapas temáticos y el resultado obtenido a través de la aplicación del NDVI muestran diferentes resultados sobre la distribución espacial de pigmentos de clorofila, esto se debe a la metodología aplicada, ya que el NDVI considera el comportamiento de los principales rasgos de absorción y reflectancia de los pigmentos de clorofila (ETM3 y ETM4 respectivamente) en tanto que la obtención de mapas temáticos considera todas las bandas espectrales, no térmicas, del sensor ETM+, lo que hace difícil la separación de firmas espectrales entre sedimentos suspendidos y pigmentos de clorofila. Sváb *et al.*, (2005) reporta que en estudios de identificación espectral de pigmentos de clorofila en lagos donde hay altas concentraciones de sedimentos suspendidos el principal problema que se enfrenta en la percepción remota es que las características espectrales de los pigmentos de clorofila cuando las cargas son bajas, se esconden en la respuesta espectral de los sedimentos suspendidos. Por esta razón en mayo cuando la principal respuesta espectral es la de sedimentos suspendidos, la firma espectral de pigmentos de clorofila es superada por la del material suspendido y se logran detectar los pigmentos de clorofila al realizar el análisis en todo el rango espectral disponible.

## 7. CONCLUSIONES

Las técnicas de percepción remota permitieron analizar, visualizar e identificar información espacial del lago de Chapala.

El lago de Chapala ocupaba un área de 846.99 Km<sup>2</sup> en mayo de 2002 mientras que para noviembre del mismo año el área que ocupaba fue de 848.29 Km<sup>2</sup>

El análisis de la clasificación supervisada indicó que la respuesta espectral en mayo de 2002 estaba dominada por la presencia de sedimentos, salvo en la parte occidental del cuerpo de agua donde predominaba la respuesta espectral de agua libre de material en suspensión. En noviembre de 2002 la respuesta espectral estuvo dominada por agua libre de materiales suspendidos. Los pigmentos de clorofila que se traducen en concentración de biomasa son la segunda firma espectral dominante del lago de Chapala, sobre todo en los bordes y parte Este del cuerpo de agua.

El análisis de cambio en las fechas de estudio resaltó la disminución de material suspendido de mayo a noviembre lo que tuvo por consecuencia que en noviembre el agua aparezca con respuesta espectral de agua con bajo contenido de sedimento en la mayor parte del lago. Con respecto a la concentración de biomasa, es importante resaltar que las áreas que mostraron mayores concentraciones de biomasa se ubicaron en los bordes del lago, con lo que se concluye que la biomasa aumento en las zonas desecadas del lago, mientras que en las zonas inundadas el contenido de biomasa disminuyó en pequeñas regiones.

El área cubierta por sedimentos suspendidos en mayo es de 688.4 km<sup>2</sup> mientras que para noviembre, tras la temporada de lluvias el área que ocupa este material es de tan sólo 57.7 km<sup>2</sup>. Para aguas con baja turbidez ya que en mayo este material apenas cubre un área de 121.3km<sup>2</sup>, y en noviembre ocupa la mayor área, 721.2 km<sup>2</sup>. Los pigmentos de clorofila cubrieron áreas de entre 36.7 y 69.9 km<sup>2</sup> en mayo y noviembre respectivamente.

Se obtuvieron a un bajo costo (imágenes de libre descarga) las características espectrales dominantes del lago de Chapala a través de la adquisición y análisis de datos satelitales. La información obtenida permitió un análisis espacial simultáneo de los factores que determinan la respuesta espectral de los materiales predominantes en el lago de Chapala.

Se demostró que los cambios estacionales, provocados por la presencia de lluvias, generan una disminución importante en la presencia de sedimentos suspendidos en el Lago de Chapala. Sin embargo, el área cubierta por vegetación no sufre ningún cambio estacional.

## 8. LINEA DE INVESTIGACIÓN A SEGUIR

La percepción remota tiene el potencial de proporcionar información de la calidad y estado trófico de los lagos (Igamberdiev, *et al.*, 2010; Hunter, *et al.*, 2010). El uso de información derivada de la percepción remota requiere del uso de sensores con altas resoluciones espectrales y espaciales debido a las características de la respuesta espectral que dominan los cuerpos de agua, como los lagos (Sváb, *et al.*, 2005)

Los datos obtenidos de percepción remota pueden relacionarse mediante análisis de regresión multivariada para proporcionar información cuantitativa sobre los parámetros que determinan la calidad del agua y el estado trófico de los lagos. La metodología a seguir para obtener un modelo que proporcione información cuantitativa de los parámetros que permiten evaluar la calidad del agua es la siguiente:

- Selección del sensor satelital con base en su resolución espacial y espectral.
- Colección de datos *in situ*
  - Medidas espectro radiométricas y/o
  - Muestreo de agua.
- Análisis de muestras de campo para obtener información de parámetros como:
  - Concentración de sedimentos suspendidos.
  - biomasa (clorofila *a*).
  - Concentración de carbono orgánico, entre otros parámetros.
- Procesamiento de datos de percepción remota.
- Análisis multivariado de reflectancia y parámetros de la calidad del agua.
- Obtención de modelos que permitan extraer información cuantitativa de la calidad o estado trófico del agua.

Finalmente recomendar la aplicación de las normas:

NOM-001-SEMARNAT-1996 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.

NOM-014-CONAGUA-2003 REQUISITOS PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUA RESIDUAL TRATADA

NOM-015-CONAGUA-2007 INFILTRACIÓN ARTIFICIAL DE AGUA A LOS ACUÍFEROS - CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE LAS OBRAS Y DEL AGUA



## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

CNA	Comisión Nacional del Agua
IRC	Infrarrojo Cercano
IRM	Infrarrojo Medio
ND	Número Digital
PCT	Punto de Control en Tierra
P_Tot	Fósforo total [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]
VB	Valor de Brillo
VIS	Región visible del espectro electromagnético

## 9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Aparicio, J., 2001, Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed. En: Hansen, A. M. y Van Afferden, M. (Eds.), The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and management. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 3-30, USA.
- Alle, R. J., & Johnson J. E., 1999, Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll a and Secchi disc depth of Bull Shoals Reservoir, Arkansas, USA. *International Journal of Remote Sensing*, **20**, 6, 1057-1072.
- Campbell, J.B., 2002, Introduction to remote sensing. 3th Ed., The Guilford Press, USA.
- Carpenter, D.J., & Carpenter, S.M., 1983, Modeling Inland Water Quality Using Landsat Data. *Remote Sensing of environment*, **13**, 345-352.
- Centrogeo, 2011, [www.centrogeo.org.mx](http://www.centrogeo.org.mx)
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2009, Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Jalisco, México.
- Comisión Nacional de Agua (CNA), 2002, Resultados de muestreos *in situ* realizado por el Centro de Estudios Limnológicos. (Información proporcionada por Ing. Jesús Amezcua Cerda. Jefe de Proyecto de Calidad de Agua del Organismo Cuenca Lerma Santiago Pacífico.)
- De Anda J., & Maniak, U., 2007, Modificaciones en el régimen hidrológico y sus efectos en la acumulación de fósforo y fosfatos en el Lago de Chapala, México. *Interciencia*, **32**, 2, 1-9.
- De Anda, J., Shear, H., Maniak, U., & Riedel, G., 2001, Phosphates in Lake Chapala, México. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. **6**, 313-321.
- De Anda, J., Quiñones-Cisneros, S., French, R., & Guzmán, M., 1998, Hydrologic balance of Lake Chapala (México). *Journal of the American Water resources association*. **34**, 6, 1319-1331.
- Dekker, A. G., & Peters, S.W.M., 1993, The use of thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands. *International Journal remote sensing*. **14**, 5, 799-821.
- Diario Oficial de la Federación & SEMARNAT, 2006, Acuerdo por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica de la cuenca Lerma-Chapala. México.
- Drury, S., 2001, Image Interpretation in Geology. 3th ed. Blackwell Science. USA

- Filonov, A. E., Tereshchenko, I. E., & Monzón, C. O., 2001, Hydro-meteorology of Lake Chapala. En: Hansen, A. M. y Van Afferden, M. The Lerma-Chapala Watershed . Evaluation and management. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 51-182, USA
- Filonov, A. E., Tereshchenko, I. E., & Monzón, C. O., 1998, Oscillations of the hydrometeorological characteristics in the region of Lake Chapala for intervals of days to decades. *Geofísica Internacional*. **37**, 4, 293-307.
- Kaufman, Y. J., & Wald, A., Remer, L., Gao, Bo-Cai, Li, Rong-Rong., 1997, The MODIS 2.1  $\mu\text{m}$  Channel-correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*. **35**, 5, 1286-1298.
- García, E, 1988, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana), Talleres de Offset Larios, México.
- Giardino, C., Pepe, M., Brivio, P., Gezzi, P. & Zilioli, E., 2001, Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *The Science of the total environment*. **268**, 1-3, 19-29.
- Gibson, P.J & Clare, H, 2000, Introductory remote sensing: digital image processing and applications. Routledge, UK.
- Harrington, J. A., Schiebe, F. & Nix, J., 1992, Remote Sensing of Lake Chicot, Arkansas: Monitoring Suspended Sediments , Turbidity , and Secchi Depth with Landsat MSS Data. *Remote Sensing of environment*. **27**, 15-27.
- Hadjimitsis, D., Clayton, C. & Hope V.S., 2004, An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*. **25**,18, 3651-3674.
- Hunter, P.D., Tyler, A.J., Willby, N.J., Gilvear, D.J., 2011, Monitoring Eutrophic Shallow Lake Environments through Airborne Remote Sensing and *In-Situ* Spectroradiometry: The Norfolk Broads, UK, and Lake Balaton, Hungary.  
[www.geog.ucl.ac.uk/~mdisney/teaching/msc\\_cons/.../hunter\\_p\\_at\\_al.doc](http://www.geog.ucl.ac.uk/~mdisney/teaching/msc_cons/.../hunter_p_at_al.doc)
- Hunter, P.D., Tyler, A.N., Carvalho, L., Codd, G.A., & Maberly, S.C., 2010, Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes. *Remote Sensing of Environment*. **114**, 2705-2718
- Igamberdiev, R.M., Lennartz B., Grensdoerffer, G., Bill, R., & Cshubert, H., 2010, Analysis of spectral signatures of small water bodies (kettle holes) in the agricultural young landscape of nrth-easter Germany. *International Journal of Remote Sensing*. **31**, 20, 5495-5511

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2009, Estrategia general para el rescate ambiental y sustentabilidad de la cuenca Lerma-Chapala.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2001, Carta de hidrología superficial Jalisco-Guanajuato, México.
- Jensen, J., 1996, Introductory digital image Processing, A remote sensing perspective, Prentice Hall Inc, USA.
- Lillesand, T., & Kiefer, R, Ch., 2008, Remote Sensing and image interpretation, 6th ed., John Wiley & Song. Inc. USA.
- Lind, O., & Dávalos-Lind, 2001, Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed. En: Hansen, A. M. y Van Afferden, M.(Eds.), The Lerma-Chapala Watershed . Evaluation and management. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 139-149, USA.
- Martin, S., 2006, An Introduction to ocean remote sensing. C. Press, USA.
- Rosas- Elquera, J., Ferrarri, L., Martínez, M. L., & Urrutia-Fucugauchi, J., 1997, Stratigraphy and Tectonics of the Guadalajara Region and Triple-Junction Area Western Mexico. *International Geology Review*. **39**, 2, 125-140.
- Sabins, Floyd F., 1987, Remote sensing: principles and interpretation. 2th Edition. W.H. Freedman and company , USA.
- Sandoval, F.P., 1994, Pasado y Futuro del Lago de Chapala, Secretaria General Unidad editorial. Gobierno del estado de Jalisco, México.
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K.C., Lenney, M.P., & Macomber, S.A., 2001, Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing Environment*, **75**, 230-244
- Sváb, E., Tyler. A.N., Preston, T., Présing, M., Balogh, K. V., 2005, Characterizing the spectral reflectance of algae in lake waters with high suspended sediment concentrations. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, 5, 919-928.
- Tyler, A.N., Svab, E., Preston, T., Présing, M. & Kovács, W.A., 2006, Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*, **27**, 8, 1521-1537.

Zarate-del Valle, P. F., & Simoneit, B.R.T., 2005, La generación de petróleo hidrotermal en sedimentos del Lago de Chapala y su relación con la actividad geotérmica del rift Citala en el estado de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **22**, 3, 258-370.

Zárate-Del Valle, P. F., Michaud, F., Parrón, C., Solana-Espinoza, G., Israde-Alcántara, I., Ramírea-Sánchez, H., & Fernex, F., 2001, Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed. En: Hansen, A. M. y Van Afferden, M. (Eds.), *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and management*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 31-57, USA.