



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**“USO DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA LA
ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE TRÓFICO DE LAS
LAGUNAS DEL PARQUE NACIONAL LAGUNAS DE
MONTEBELLO”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
BIÓLOGO
PRESENTA
LESLI BELEN VILLALPANDO ALANIZ

Director de tesis: Roberto Bonifaz Alfonzo

Asesor interno: Eliseo Cantellano De Rosas

MÉXICO D.F. 2015





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

RESUMEN	
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2	3
MARCO TEÓRICO	3
PERCEPCIÓN REMOTA	3
CLOROFILA “a”	9
FLUORESCENCIA.....	10
ÍNDICE TRÓFICO DE CARLSON (IET) Y EUTROFIZACIÓN	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
ÁREA DE ESTUDIO	16
VEGETACIÓN.....	16
TIPOS DE SUELO	16
CLIMA.....	17
FAUNA.....	17
HIDROLOGÍA.....	17
OBJETIVOS	20
GENERAL:	20
ESPECÍFICOS:.....	20
CAPÍTULO 3	21
MATERIAL Y MÉTODO.....	21
DISEÑO (TIPO DE ESTUDIO).....	21
UNIVERSO (POBLACIÓN O MUESTRA).....	21
VARIABLES.....	22
IMAGEN SATELITAL SPOT (Satélite Para la Observación de la Tierra).....	24
ESPECTRO RADIÓMETRO USB2000	24
PERFILADOR BIOSPHERICAL PNF-300	26
ESPECTROFLUORÓMETRO	26
TÉCNICAS	28
TRANSPARENCIA DEL AGUA	28
OBTENCIÓN DE CLOROFILA.....	28
CALIBRACIÓN DEL ESPECTROFLUORÓMETRO	30
ANÁLISIS Y CÁLCULOS.....	30
MÉTODOS DE PRE-PROCESAMIENTO Y CORRECCIÓN DE IMAGEN	31
CAPÍTULO 4	33
RESULTADOS	33

CAPÍTULO 5	58
DISCUSIÓN.....	58
CAPÍTULO 6	61
CONCLUSIONES	61
PERSPECTIVAS	62
REFERENCIAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 LONGITUDES DE ONDA DEL ESPECTRO DE LUZ VISIBLE Y RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA.....	7
FIGURA 2 FIRMAS ESPECTRALES (ESTRUCH, 2010).....	8
FIGURA 3 ESTRUCTURA DE LA MOLÉCULA DE CLOROFILA (KIRK, 1994).....	9
FIGURA 4 ESPECTRO DE ABSORCIÓN DE LA CLOROFILA (KIRK, 1994).....	11
FIGURA 5 CAMBIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS EN LA CALIDAD DEL AGUA CAUSADOS POR EL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN (FAO, 1997).	13
FIGURA 6 ÁREA DEL PARQUE NACIONAL LAGUNAS DE MONTEBELLO E IMAGEN SATELITAL SPOT 6 (05-12-2013) Y NOMBRE DE LOS SITIOS DE MUESTREO.	19
FIGURA 7 IMAGEN SPOT 6 MUESTRA ÁREA DE ESTUDIO Y SITIOS DE MUESTREO.	23
FIGURA 8 SATÉLITE SPOT6 Y 7 EN ÓRBITA	24
FIGURA 9 ESPECTRO RADIÓMETRO OCEAN OPTICS (OCEAN OPTICS, INC, 2010).....	26
FIGURA 10 ESPECTROFLUOROMETRO 10-AU	27
FIGURA 11 MAPA DE VALORES DE PH	36
FIGURA 12 MAPA DE VALORES DE PORCENTAJE DE OXÍGENO DISUELTO.....	37
FIGURA 13 MAPA DE VALORES DE CONDUCTANCIA.....	38
FIGURA 14 MAPA DE VALORES DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA "A"	39
FIGURA 15 MÁSCARA DE REFLECTANCIA DE LA BANDA AZUL	50
FIGURA 16 MÁSCARA DE REFLECTANCIA DE LA BANDA VERDE	51
FIGURA 17 MÁSCARA DE REFLECTANCIA DE LA BANDA ROJA.....	52
FIGURA 18 MÁSCARA DE REFLECTANCIA DE LA BANDA DE INFRARROJO CERCANO.....	53
FIGURA 19 MAPA DEL COCIENTE ROJO-INFRARROJO	55
FIGURA 20 MAPA COCIENTE AZUL-VERDE	56
FIGURA 21 HISTOGRAMA DE LA IMAGEN DEL COCIENTE AZUL-VERDE	57

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 PROMEDIOS DE REFLECTANCIA PARA CADA SITIO DE MUESTREO.....	33
TABLA 2 CONDICIONES DEL AGUA Y CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA - "A" EN CADA UNO DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	34
TABLA 3 COORDENADAS GEOGRÁFICAS, HORA, FECHA DE MUESTREO Y VALORES DE TRANSPARENCIA DE DISCO DE SECCHI PARA CADA SITIO.....	43
TABLA 4 VALORES DE DS Y CL A OBTENIDOS Y VALORES ESTADO TRÓFICO.....	44
TABLA 5 CATEGORÍAS DE IET DE ACUERDO A LOS VALORES DE CON CLOROFILA "A"	45
TABLA 6 CATEGORÍAS DE IET DE ACUERDO A LOS VALORES DE CON CLOROFILA "A"	45
TABLA 7 CATEGORÍAS DE IET DE ACUERDO A LOS VALORES DE DISCO DE SECCHI.....	45
TABLA 8 VALORES DE PIXEL POR BANDA Y COCIENTES.....	54

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1 FIRMAS ESPECTRALES DE 16 DE LOS 21 SITIOS Y FIRMA PATRÓN.	40
GRÁFICA 2 FIRMA ESPECTRAL DE LIQUIDAMBAR Y SAN LORENZO.	41
GRÁFICA 3 FIRMA ESPECTRAL DE LA ENCANTADA, BOSQUE AZUL, PASO DEL SOLDADO, CANAL Y CHIMPOTRERO.....	42
GRÁFICA 4 CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA EN CADA ESTACIÓN.	46
GRÁFICA 5 ÍNDICE DE CARLSON Y CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA "A".	47
GRÁFICA 6 COCIENTE AZUL/VERDE Y CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA.	48
GRÁFICA 7 RELACIÓN ENTRE EL COCIENTE ROJO/INFRARROJO Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA.	48

RESUMEN

La eutrofización de los cuerpos de agua son problemas de gran importancia en la actualidad, estos procesos consisten principalmente en un incremento excesivo en la cantidad de nutrientes y un deterioro de la calidad del agua, que afectan el funcionamiento y estructura de los ecosistemas acuáticos.

Realizar estudios que permitan conocer los niveles de perturbación en las zonas aledañas y en los mismos cuerpos de agua es de suma importancia para determinar su estado y plantear alternativas de control, manejo y restauración con herramientas que permitan la toma de decisiones a largo plazo.

En este trabajo se utilizó el índice de Carlson de dos maneras, la generalmente utilizada con valores de transparencia del Disco de *Secchi* y concentración de clorofila "a" y se propone el uso de percepción remota (espectrorradiometría y procesamiento de imágenes de satélite) como herramienta para la estimación del estado trófico utilizando cocientes a longitudes de onda específicas, éste procedimiento permite obtener datos preliminares de manera rápida y extrapolable para el monitoreo continuo del Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM).

Los resultados muestran que el estado trófico de los cuerpos de agua en general es de eutrofia, siendo el lago "La encantada" el único en condición mesotrófica y el lago de mayor eutrofia "Liquidámbar" ubicado al noroeste del PNLM, concluyendo que los lagos de Montebello se encuentran bajo condiciones inestables y de deterioro ambiental moderado y con tendencia a grave

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los procesos de eutrofización en cuerpos de agua, si bien pueden ser naturales, también pueden ser modificados y acelerados fuertemente por condiciones antrópicas, tal es el caso de una serie de lagos dentro del Parque Nacional Lagunas de Montebello en Chiapas que han tenido modificaciones en su coloración natural. A partir de 2012, se han realizado actividades e investigaciones para determinar sus causas y proponer alternativas de mitigación, dado el tamaño y complejidad del problema, en este trabajo se propone el uso de sensores remotos como una herramienta para estimar el nivel de eutrofización del sistema, evaluar las ventajas y desventajas del uso de los mismos, el nivel de certidumbre y como opción aditiva a los estudios de monitoreo ambiental.

Este tipo de estudios son importantes para generar información de manera rápida y confiable con el fin de agilizar la toma de decisiones al momento de realizar un plan de manejo para la conservación, remediación y recuperación de ecosistemas lacustres.

Por la importancia del área, la declaración de protección en la categoría de Parque Nacional se realizó a través del Decreto Presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de diciembre de 1959, por su belleza escénica y su diversidad biológica. Se declara como Área natural protegida ANP, con el fin de conservar los bienes y servicios ambientales que producen sus ecosistemas incluyendo el resguardo del patrimonio genético, la absorción de gases efecto invernadero, la regulación climática, el mantenimiento de recursos hídricos, la conservación de suelos, la preservación de valores paisajísticos, la producción de recursos forestales maderables y no maderables y la estructuración de hábitat para una amplia diversidad de flora y fauna (DOF, 2009).

En el entorno de la cuenca hidrográfica del Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM) se llevan a cabo actividades productivas que pueden modificar el estado natural de los sistemas acuáticos, por lo general, están asociadas al cambio de uso del suelo, resultado de las demandas del crecimiento de la población. PNLM también es fuente de ingresos y con ello se pueden introducir contaminantes por escorrentía a través de la sobreexplotación agropecuaria, mediante el arrastre de compuestos u organismos que se encuentran en el suelo. Los asentamientos humanos se han desarrollado al margen de ríos y lagos a lo largo de la historia, debido a que el agua es un recurso indispensable para el desarrollo de actividades productivas.

Es por ello que en la zona requiere de un estudio para encontrar con métodos e instrumentos para la aportación de soluciones para la prevención y control a mediano y largo plazo del estado trófico del complejo lagunar, para un mejor aprovechamiento de los recursos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

PERCEPCIÓN REMOTA

El término “percepción remota” (PR), fue acuñado en 1960 por Evelyn Pruitt de la Oficina de Investigación Naval de los Estados Unidos. La historia de percepción remota, sin embargo, es considerablemente más antigua. Las primeras fotografías aéreas fueron tomadas desde un globo cerca de París en 1858. Durante los siguientes cincuenta años se lograron avances significativos en el diseño de cámaras y emulsiones de películas. Las fotografías fueron tomadas desde plataformas tan diversas como papalotes, cohetes y aún desde palomas mensajeras. La primera fotografía tomada de un aeroplano fue una película tomada sobre Centochelli, Italia en 1909, en un avión piloteado por Wilbur Wright. La mayoría de estas fotografías iniciales proporcionaron una visión oblicua del suelo en lugar de vertical. Las fotografías ilustrativas populares de un gran número de ciudades y de otras atracciones escénicas fueron producidas utilizando estos medios. Los científicos, sin embargo, reconocieron el potencial de la fotografía aérea como una herramienta de mapeo y gradualmente la ciencia de fotogrametría se fue desarrollando. (Butler *et al.*, 1990)

En los años cincuenta, se desarrollaron los sistemas de imágenes térmicas infrarrojas que proporcionaban una “película de calor” de objetos o terrenos, como los radares. Los sistemas infrarrojos térmicos no son dependientes de la disponibilidad de luz, pero a diferencia de los radares, éstos son incapaces de “ver” a través de las nubes. Ambos de estos sistemas fueron originalmente diseñados para uso militar y no estuvieron disponibles para aplicaciones civiles por muchos años. El emplazamiento del Sputnik 1 por la Unión Soviética en 1957, marcó el principio de la “era espacial”. En 1959, el satélite estadounidense EXPLORER-6 transmitió la primera imagen de la tierra vista

desde el espacio. El primer satélite meteorológico del mundo TIROS-1 fué lanzado en 1960. Este fué el que encabezó los satélites ambientales más avanzados que actualmente están en operación. Los vuelos espaciales tripulados por hombres fueron particularmente importantes para crear interés en la potencialidad para el mapeo de recursos y el monitoreo desde el espacio. Operando en una órbita menor que la de los satélites meteorológicos, LANDSAT y sistemas posteriores similares, han proporcionado un gran detalle espacial, aunque su cobertura temporal es menos frecuente. Aunque los sensores fueron seleccionados primariamente para aplicaciones terrestres, han probado ser bastante útiles en estudios costeros y marinos (Butler *et al.*, 1990).

Adicionalmente a los satélites que actualmente están en operación, han habido un número considerable de sistemas experimentales los cuales han demostrado de nuevo el valor del monitoreo del medio ambiente marino desde el espacio. Entre ellos, los más prominentes han sido el satélite NIMBUS-7 que transportó el Barredor de Color de la Zona Costera (CZCS) y también el satélite SEASAT de corta duración que transportó un buen número de sensores marinos especializados. En años recientes, varias naciones, adicionalmente a la Unión Soviética y a los Estados Unidos, han lanzado sus propios satélites de percepción remota (Butler *et al.*, 1990).

El primer satélite para el estudio de los recursos naturales lanzado por la NASA en julio de 1972 fue el llamado LANDSAT, posteriormente fueron puestos en órbita los satélites LANDSAT 2 Y LANDSAT 3 en 1975 y 1978 respectivamente, por la necesidad de disponer de imágenes con mayor resolución espacial, en 1984 fue lanzado en órbita el satélite SPOT (Sacristán- Romero, 2006).

El término empleado para describir el estudio de un objeto sin tener contacto físico con él es percepción remota, en esta definición se incluyen las mediciones de las propiedades físicas de un objeto realizadas a distancia. La tecnología satelital es un ejemplo de percepción remota, dado que los sensores transportados en los satélites están diseñados para estudiar la energía reflejada y emitida por la superficie terrestre (Gómez, 2014).

Con información de sensores remotos se pueden analizar grandes superficies de agua con unos tiempos y costos relativamente bajos. Esta manera supone una atractiva alternativa al estudio de los ecosistemas acuáticos, desde pequeños lagos hasta grandes masas de agua como mares u océanos. La concentración de clorofila "a" es uno de los parámetros más importantes en el estudio de las características y el estado del agua (Desortová *et al.*, 1996).

Hoy en día, es posible evaluar con precisión las condiciones tróficas de un cuerpo de agua mediante el uso de sensores remotos hiperspectrales midiendo su reflectancia *in-situ*. Una de las principales ventajas de este tipo de estudios es la posibilidad del uso de funciones matemáticas tales como el coeficiente de atenuación y reflectancia, entre otros algoritmos para realizar un análisis más profundo utilizando datos de satélite por bandas y validando la información con trabajo de campo donde se calibran los datos de satélite por mediciones *in-situ* de la concentración de pigmentos fotosintéticos en cuerpos de agua tal como clorofila "a", "b", "c", y carotenoides. En México se han analizado firmas espectrales tanto del mar como de distintos cuerpos de agua, mediante análisis hiperspectral detectando la presencia de vegetación acuática sumergida y fitoplancton, así como de los cambios en series de tiempo (Gómez, 2014).

La percepción remota o teledetección de los recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biósfera, que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre. La percepción remota consiste de cuatro componentes: la fuente de radiación, el medio de propagación, el objeto de estudio y el sensor (Gómez, 2001).

La radiación del sol es la principal fuente de luz en la Tierra, el uso de la percepción remota permite conocer características físicas de los objetos midiendo la radiación que éstos reflejan. La radiación es captada por un sensor electrónico que devuelve señales digitales capaces de medir valores de radiación visible, así como otras regiones del espectro electromagnético como el infrarrojo o microondas. Estos sensores pueden ser portátiles o estar montados en plataformas terrestres, marítimas, aéreas o espaciales (Chávez, 2012).

Es importante resaltar que la radiación que incide sobre la superficie terrestre no es la misma que viaja por el espacio exterior, sino que ésta ha sido afectada por los gases de la atmósfera (Mobley, 1999). La luz solar pasa por un cambio de fase, viajando desde el vacío que se encuentra en el espacio exterior a través de una fase gaseosa que es la atmósfera, el fundamento físico de la teledetección se basa en la interacción de la energía electromagnética (Figura 1) con la cobertura terrestre. Estas tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado tanto por factores externos (ambientales) como por sus propias características físicas y químicas en el momento de la toma de la imagen (Swain y Davis, 1978).

Todos los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia, la PR estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas

electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres.

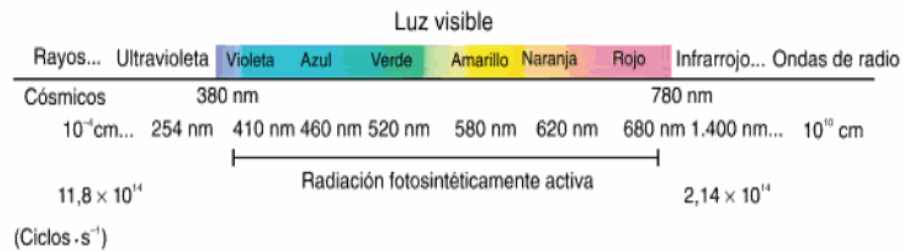


Figura 1 Longitudes de onda del espectro de luz visible y radiación fotosintéticamente activa.

Su objetivo esencial se centra en la identificación de los fenómenos que en ella se operan, la información se recoge desde plataformas de observación pueden ser aéreas o espaciales, éstas plataformas son susceptibles a recibir y medir la intensidad de la radiación que procede la superficie de la Tierra en una gama de longitud de onda específica y transformarla en una señal que permita localizar, registrar y digitalizar la información en forma de fotografías, imágenes numéricas grabadas en cinta magnética, valores y gráficas compatibles con una computadora. Los sensores pueden ser cámaras fotográficas, radiómetros de barrido multiespectral, radares, láseres, que generen imágenes analizando la radiación emitida o reflejada sensibles a diferentes longitudes de onda: ultravioleta, visible, infrarrojos e con el fin de conocer las diferentes propiedades la cobertura terrestre (Sacristán- Romero, 2006).

Sin embargo, en el agua ocurren fenómenos de absorción y dispersión tanto por la materia suspendida como disuelta, además de un fenómeno de atenuación de la luz propio del líquido. Es muy importante tomar en cuenta los cambios de fase al momento de realizar estudios de percepción remota de objetos en la superficie terrestre (Rees, 2001).

Los datos procedentes de la PR son una gran fuente de información para monitorear la calidad del agua. Los fundamentos de percepción remota se abordan desde el campo de la física, y concretamente, en los ámbitos de la óptica y la electrónica. La observación remota es posible gracias a la interacción entre un flujo de energía con las cubiertas terrestres, los analistas de percepción remota utilizan las propiedades espectrales para ayudarse a distinguir los objetos en los diferentes tipos de estudio, dado que los objetos absorben y reflejan energía electromagnética de acuerdo a su composición molecular en diferentes superficies. Los patrones de respuesta espectral, son comúnmente llamados *firmas espectrales*, un material en particular puede ser descrito en forma gráfica, mostrando los porcentajes de radiación a diferentes longitudes de onda reflejada de un objeto, llamándolo curva de respuesta espectral. (Aronoff, 2005).

La Figura 2 muestra la respuesta espectral típica del suelo, agua, vegetación y nieve permitiendo identificar cada una de ellas de acuerdo a su composición.

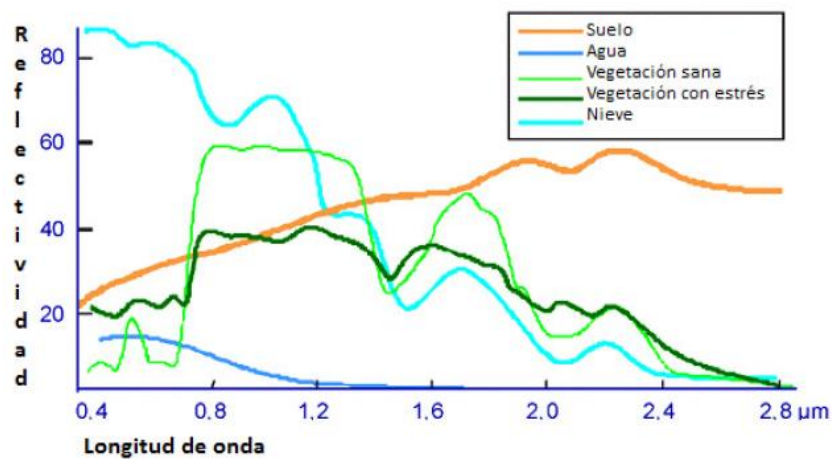


Figura 2 Firmas espectrales (Estruch, 2010)

CLOROFILA “a”

La clorofila es el pigmento fotorreceptor responsable de la primera etapa en la transformación de la energía de la luz solar en energía química, y consecuentemente la molécula responsable de la existencia de vida superior en la Tierra. Se encuentra en orgánulos específicos, los cloroplastos. Este estudio se centra en la clorofila contenida en organismos acuáticos, concretamente en la clorofila “a” que es la mayoritaria. (Ebro-URS. 2005) y el conocer su proporción puede ser indicador de las condiciones ambientales de cuerpos de agua.

La concentración de clorofila “a” es el parámetro bioquímico de mayor importancia medido en investigaciones marinas, es una medida indirecta como indicador de biomasa del fitoplancton de océanos y aguas dulces. Químicamente, las clorofilas son compuestos cíclicos tetrapirrólicos con un átomo de magnesio quelado en el centro del sistema de anillos (Figura 3). La clorofila “a” y “b” son derivados de la dihidroporfirina. Todas las plantas contienen clorofila “a” y la mayoría contienen además clorofila “b” o “c”. Entre las algas, el contenido de clorofila varía considerablemente; dependiendo de la temporada del año (Suggett, *et.al*; 2011).

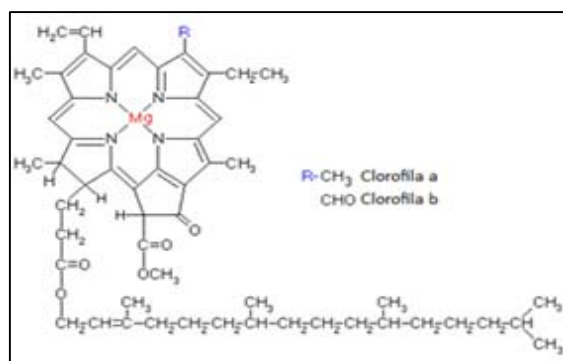


Figura 3 Estructura de la molécula de clorofila (Kirk, 1994)

Las propiedades de absorción de la luz por parte de la clorofila se interpretan en términos de dos estados excitados de los electrones (alto y bajo). Cada uno tiene una banda de absorción fuerte en el rojo y otra banda más fuerte en la región azul; entre más baja sea la longitud de onda de absorción, más alta es la energía de los fotones absorbidos, por lo que el nivel de energía al cual los electrones se excitan es mayor. Estos picos otorgan a la clorofila un patrón de absorción único y determinan la firma espectral de esta sustancia (Kirk, 1994).

Las clorofilas tienen típicamente dos puntos de absorción en el espectro visible, uno en el entorno de la luz azul (400-500 nm de longitud de onda), y otro en el rojo (600-700 nm); sin embargo reflejan la parte media del espectro, la más nutrida y correspondiente al color verde (500-600 nm). Esta es la razón por la que las clorofilas tienen color verde, y es factible utilizar imágenes satelitales de sensores que tengan sensibilidad a estas longitudes de onda. (Estruch, 2010).

FLUORESCENCIA

Las propiedades de absorción de la luz de la clorofila se interpretan en términos de dos estados del espectro en un solo pico de excitación de electrones (superior e inferior). Los espectros de absorción de las clorofilas "a" y "b" en disolventes orgánicos se muestran en la Figura 4.

Cada una tiene una banda de absorción fuerte en el rojo (correspondiente al estado del espectro en el pico inferior) y otra banda más fuerte (la banda correspondiente al estado del espectro en el pico superior) en la región azul. En este nivel, la molécula excitada puede volver al estado basal mediante la emisión de un fotón (fluorescencia). Dado que el cambio en niveles de energía es prácticamente igual al de la excitación de la molécula,

el pico de la fluorescencia se encuentra adyacente al pico está centrada en 640 nm, pero ligeramente desfasado hacia el rojo, ubicado experimentalmente en los 666nm. Sin embargo, al ocurrir la disipación de la energía en forma de calor, la señal *in vivo* se detecta alrededor de los 685nm. El color que resulta cuando la luz es absorbida y luego emitida en una longitud de onda más larga, también se ha mencionado como componente de la reflectancia captada por sensores remotos. Se ha encontrado que 5 pigmentos causan fluorescencia en corales arrecifales del Caribe (Mazel, 1995). La detección remota de estos pigmentos, mediante activación de la fluorescencia, se ha utilizado para diferenciación interespecífica y la detección de colonias blanqueadas (Hardy et. al., 1992). Estudios previos de percepción remota (Topliss y Paltt, 1986) han detectado picos alrededor de los 685nm provocados por fluorescencia de la clorofila "a" inducida por la luz solar.

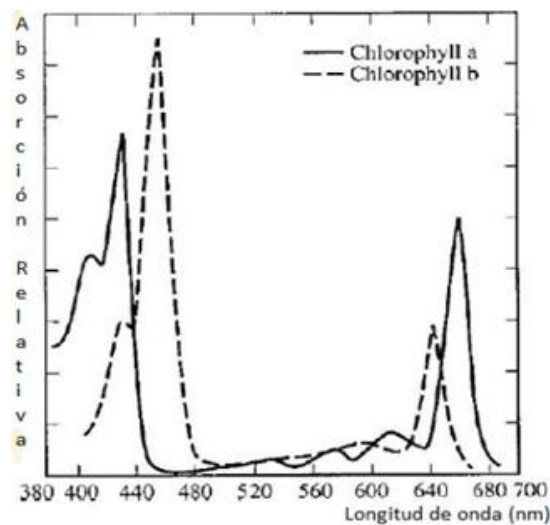


Figura 4 Espectro de absorción de la clorofila (Kirk, 1994)

ÍNDICE TRÓFICO DE CARLSON (IET) Y EUTROFIZACIÓN

El índice de estado trófico de Carlson o IET (Índice de Estado Trófico) es uno de los índices más utilizados para evaluar el estado trófico de un cuerpo de agua, es propio para medir el grado de eutrofia en aguas dulces lénticas, ha sido propuesto por la

Agencia de Protección Ambiental de los EEUU, (EPA por sus siglas en inglés) a partir de 1991 como un análisis de rutina de monitoreo de la calidad de lagos. Se basa en medir transparencia mediante el Disco de *Secchi* (DS), clorofila "a" y fósforo total. Este índice puede variar entre 0 (oligotrófico) y 100 (hipereutrófico).

Se obtiene a partir de una transformación de la transparencia del DS. El autor desarrolla las siguientes formulas: (De la Lanza, 2000)

$$IET(\text{Disco de Secchi}) = 10 \left(6 - \frac{\text{Ln disco de Secchi}}{\text{Ln } 2} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

$$IET(\text{Clorofila "a"}) = 10 \left(6 - \frac{2.04 - 0.68 \text{ Ln Clorofila "a"}}{\text{Ln } 2} \right) \quad \text{Ec. 2}$$

De acuerdo a los valores que alcanzan el IET es posible diferenciar cuatro categorías:

- | | |
|-------------------|---------------|
| 1. Oligotrófico | IET < 30 |
| 2. Mesotrófico | 30 < IET < 60 |
| 3. Eutrófico | 60 < IET < 90 |
| 4. Hipereutrófico | IET > 90 |

La eutrofización consiste en alterar un sistema acuático desde el exterior, con la incorporación de más nutrientes y materia orgánica, que alteran temporalmente sus condiciones, induciendo desviaciones en las características del sistema, en su composición biótica y en su sucesión; si bien la eutrofización se produce de forma natural, normalmente está asociada a fuentes antropogénicas de nutrientes, la agricultura es una de las principales actividades que provocan la eutrofización de las aguas superficiales (Figura 5). Estos procesos introducen cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua (FAO, 1997).

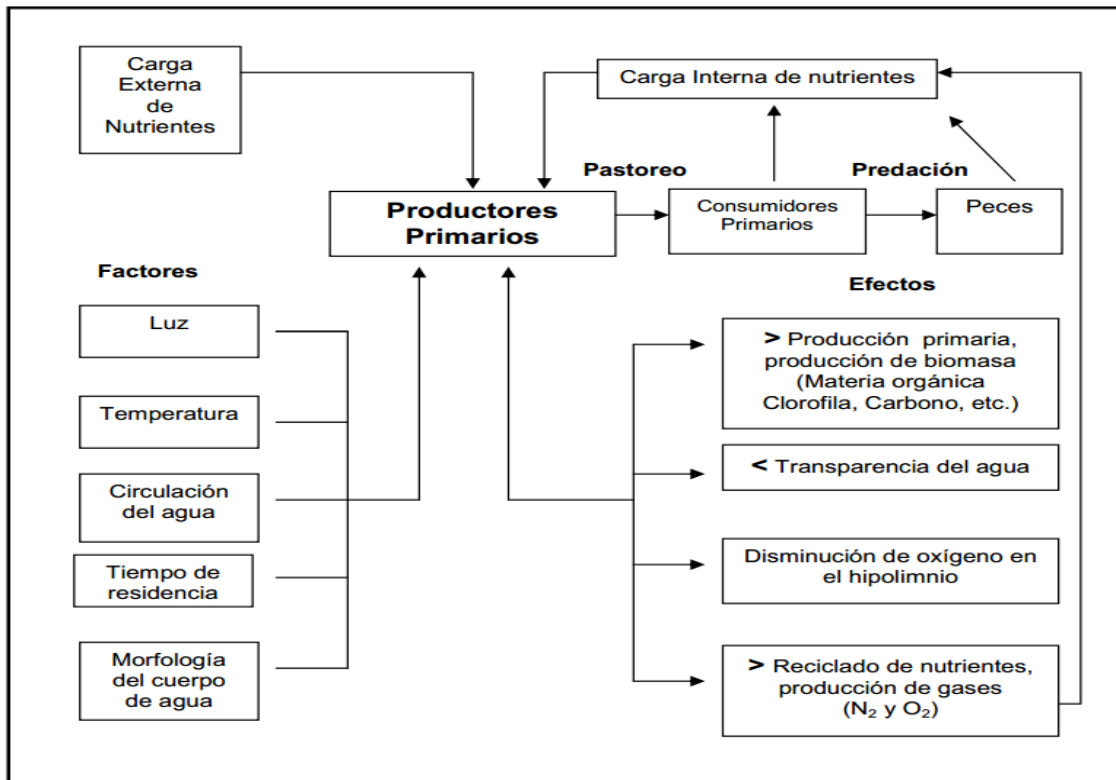


Figura 5 Cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua causados por el proceso de eutrofización (FAO, 1997).

Se ha logrado detectar por medio de satélite florecimientos de *Karenia brevis* en concentraciones muy bajas de hasta 50 células por mililitro, lo que equivale a 0.5 Pg de clorofila por litro (Tester y Stumpf, 1998)

En la reserva de Te-Chi en Taiwan se demostró la posibilidad de derivar la concentración de fósforo y clorofila, además de la profundidad *secchi* o coeficiente de extinción a partir de imágenes SPOT mediante el análisis de varias imágenes tomadas el mismo día, logrando obtener un mapa temático de estado trófico. (Yang *et. al.*, 1999).

En un proyecto conjunto, el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe y el Departamento de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Alabama,

detectaron un afloramiento masivo de plancton ocurrido en el lago Atitlán en Guatemala en octubre de 2009, detectando la disminución de la superficie del lago durante la época seca de casi 3km² (Castellanos *et al.*, 2002).

Dall'Olmo y Gitelson (2006) realizaron un estudio con el objetivo de ampliar el conocimiento de las propiedades de absorción de la radiación por parte de lagos mediante la descripción de características espectrales, utilizando exclusivamente las propiedades ópticas. Se analizó la distribución espectral e intensidad de la luz para fitoplancton, a partir de coeficientes de absorción medidos directamente y los obtenidos por espectros de reflectancia lo que mostró un gran potencial para la caracterización de los ecosistemas lénticos (Dall'Olmo *et al.*, 2006).

Se han estudiado los modelos de dos y tres bandas de los sensores SeaWiFS y MODIS en la bahía de Chesapeake para la estimación de clorofila ha utilizado espectrorradiómetros. Se evaluó el rango espectral, infrarrojo e infrarrojo cercano en 2007, así como en 2009 desarrollando algoritmos relacionados con la estimación de clorofila obtenida con sensores de fluorimetría y comparando con los sensores satelitales MODIS y MERIS en lagos y embalses de Nebraska. (Matishov *et al.*, 2010).

En el Mar de Galilea se realizaron estudios de modelos conceptuales de la estimación de clorofila en aguas turbias comparando bandas de los satélites MODIS y MERIS para evidenciar el contraste de resultados con los lagos de Nebraska, mostrando el potencial de los métodos y algoritmos a utilizar para la estimación de Clorofila (Yacobi *et al.*, 2010).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Río Grande de Comitán, constituye el río principal de la subcuenca que desemboca en el Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM); con el crecimiento de las fronteras urbanas, rurales, agrícola-ganaderas y pesqueras; el sistema hidrológico del Parque se ve afectado por las diferentes descargas de sustancias químicas orgánicas, plásticos, plaguicidas, detergentes, sedimentos o materia suspendida, y partículas insolubles de suelo que enturbian el agua y que son la mayor fuente de contaminación. (CONANP, 2011)

El exceso de nutrientes o eutrofización constituye un problema de tipo ecológico en muchos cuerpos de agua del país; provoca estrés fótico, disminución del oxígeno disuelto, que deriva eventualmente en pérdida de biodiversidad y desecación de cuerpos lacustres.

Siendo el PNLM un área protegida desde hace más de 50 años, es prioritario su monitoreo debido a los múltiples servicios ambientales que otorga; una de las ventajas que ofrece el uso de la percepción remota es la rápida adquisición de gran cantidad de datos uniformes de escala espacial mayor a la cubierta que puede llegar a ser alcanzada por una colecta de campo, una mejor relación costo-beneficio para diferentes tipos de estudios así como el potencial de llevar a cabo estudios retrospectivos de análisis de detección de cambios o actividades de monitoreo que van desde simples observaciones visuales hasta complejos estudios químicos, físicos y biológicos.

La necesidad de detectar los cambios que ocurren en el medio ambiente, causados de manera natural o por la actividad humana, se ha incrementado drásticamente; con una adecuada metodología es posible evaluar con rapidez y precisión el estado de productividad de cuerpos lacustres. Existen limitaciones derivadas de la tecnología de

percepción, el comportamiento de la luz, condiciones climáticas, resolución, software, hardware, las cuales han sido contempladas con el fin de disminuir el efecto de las mismas con diferentes tipos de metodologías para la obtención de mejores resultados con el objetivo de obtener mayor precisión en diversos estudios.

ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Lagunas de Montebello se localiza en la región Sur-Sureste del estado de Chiapas, en la frontera con Guatemala (Figura 6). Abarca una superficie de 6,425-49-27 hectáreas áreas-centiáreas y comprende parte de los municipios La Independencia y La Trinitaria; este último abarca 95% de la superficie del Área Natural Protegida (ANP). Sus coordenadas extremas son 16° 04' 40" y 16° 10' 20" Latitud Norte y 91° 37' 40" y 91° 47' 40" Longitud Oeste.

VEGETACIÓN

El PNLM presenta como principales asociaciones vegetales: bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mesófilo de montaña, vegetación riparia, vegetación secundaria y zonas de cultivo. La riqueza de especies leñosas en el PNLM está representada con 208 especies y representa el 53% de la composición florística de especies leñosas registradas para regiones como la de Los Altos de Chiapas, compuesta por 388 especies de arbustos y árboles (SEMARNAT-CONANP, 2007).

TIPOS DE SUELO

La mayor parte de los suelos del Parque se ha desarrollado de las calizas o de sedimentos fluviales y lacustres, se identifican los tipos de suelo: Litosoles, Rendzinas, Vertisoles, Acrisoles, Fluvisoles y Gleysoles.

CLIMA

La zona presenta clima tipo C (fm) templado húmedo con lluvias todo el año y en el extremo Noroeste un clima tipo A (cm) cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, la temperatura media mensual es de 23.6 °C con una oscilación térmica anual de 5.6 °C; el mes más frío es enero con un promedio mensual de 20.9 °C y el más cálido en abril, con un promedio mensual de 25.6 °C.

FAUNA

El análisis de la riqueza faunística muestra una gran variedad que incluye anfibios como salamandras, sapos y ranas arborícolas, en reptiles sobresalen tortugas, serpientes y lagartijas. En cuanto a las aves destacan el pajuil, el pájaro carpintero, la chachalaca, la paloma de alas blancas, los patos migratorios y en la parte noroeste se encuentra el quetzal. En mamíferos se pueden mencionar el tlacuache, armadillo, tepezcuintle, el viejo de monte, el venado cola blanca, la zorra gris y el oso hormiguero.

HIDROLOGÍA

Lagunas de Montebello obtuvo el reconocimiento como Sitio RAMSAR, siendo el número 1325 designado el 27 de noviembre de 2003. Los lagos constituyen un complejo lacustre de origen cárstico, extendido entre territorio mexicano y guatemalteco. La alimentación de las aguas lacustres es principalmente subterránea. Está comprendido en la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva- Usumacinta y forma parte de la subcuenca del Río Grande de Comitán con 810 km², que a su vez es parte de la cuenca del Río Lacantún (INEGI, 1988).

Son siete los principales lagos del Parque, el Sistema Tepancoapan (13 km de longitud) está considerado como un cuerpo de agua continuo que reúne además a los lagos San

Lorenzo, Bosque Azul, Península, Encantada y Esmeralda, éstos se comunican por la inundación de sus áreas colindantes durante la época de lluvia. El desagüe parcial del sistema se realiza a través de un arroyo que se alimenta de las aguas de San Lorenzo y Bosque Azul, a través de un sumidero en el sitio denominado El Arco. Con base en sus dimensiones, le siguen en importancia los lagos de Tzisco (3.6 km de longitud); Montebello (2 km de longitud); y Pojoj (un kilómetro de longitud). Muchos lagos de menor dimensión poseen belleza escénica relevante, entre ellos: Agua Tinta y Ensueño, ubicados al Sureste del Sistema de Lagos Tepancoapan y Cinco Lagos, al Este del Lago Montebello. (CONANP, 2011). La Figura 6 es una imagen de satélite en donde se contrasta en colores verdes los lagos afectados y la zona en donde se concentraron los muestreos.

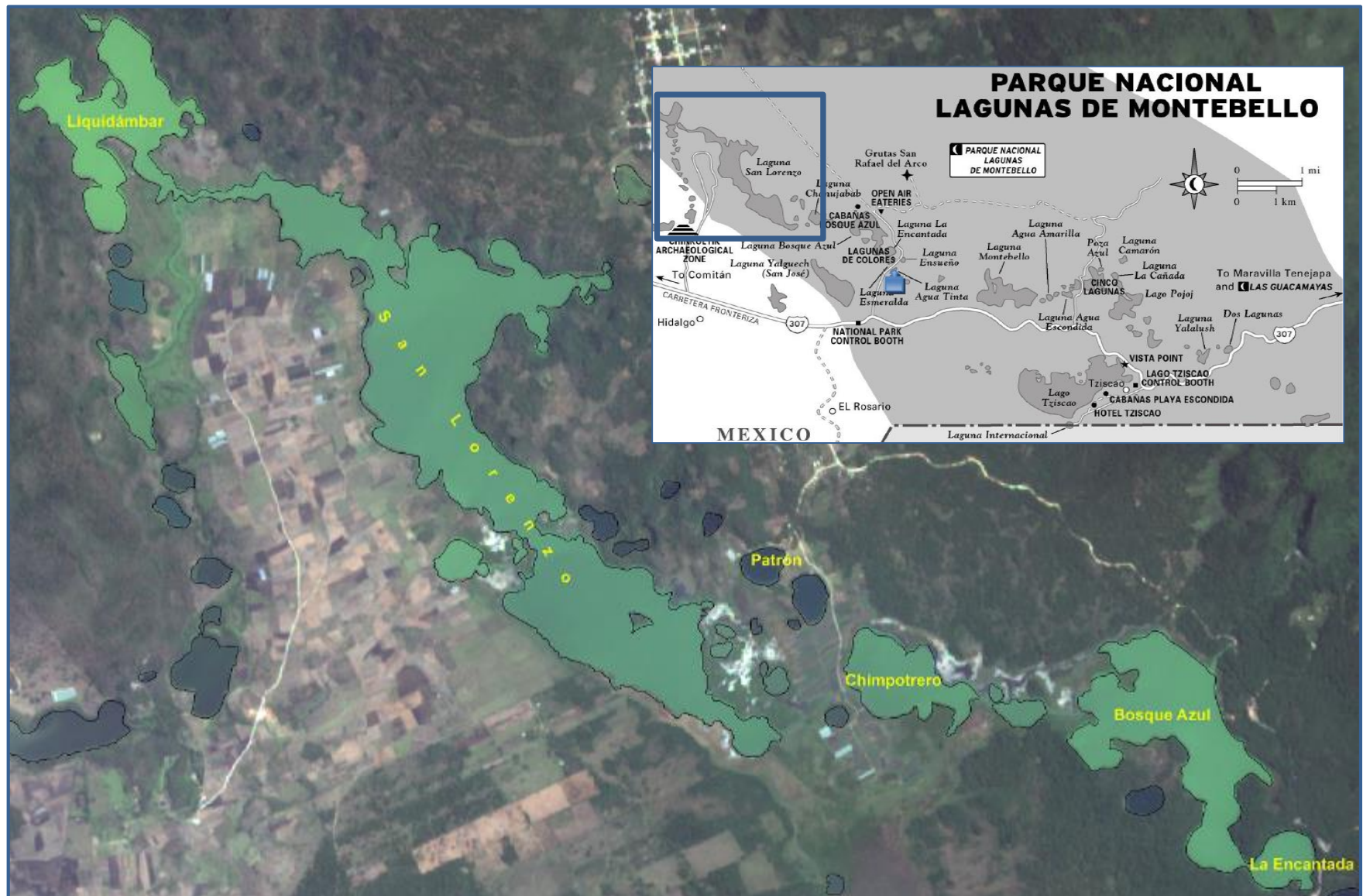


Figura 6 Área del parque Nacional Lagunas de Montebello e imagen satelital Spot 6 (05-12-2013) y nombre de los sitios de muestreo.

OBJETIVOS

GENERAL:

Determinar el estado trófico del Parque Nacional Lagunas de Montebello mediante el uso de percepción remota.

ESPECÍFICOS:

- Obtener la firma espectral de Clorofila "a" de seis cuerpos de agua del PNLM.
- Determinar la concentración de Clorofila "a" en el PNLM con el espectrofluorómetro 10AU en laboratorio.
- Evaluar el índice trófico de Carlson en los lagos del PNLM.

CAPÍTULO 3

MATERIAL Y MÉTODO

DISEÑO (TIPO DE ESTUDIO)

Se trata de un estudio observacional, prospectivo y comparativo donde se midieron variables físicas y biológicas de un ecosistema lacustre *in situ*, para comparar la concentración de clorofila con estimaciones derivadas de una imagen satelital, pre procesada y proporcionada por el SIAP-ERMEX con fecha de adquisición doce de marzo del dos mil catorce, imagen del distribuidor francés SPOT con referencia espacial WGS-84 UTM zona 15N y cobertura espacial de 60 kilómetros.

UNIVERSO (POBLACIÓN O MUESTRA)

Los puntos se seleccionaron a partir del análisis de las imágenes de compuestos en color que manifiestan las diferentes condiciones de transparencia del sistema lacustre y a partir de resultados preliminares de muestreos hechos con anterioridad por otros grupos del mismo proyecto pero con diferentes objetivos y tratando de cubrir el mayor universo posible. Los muestreos se hicieron únicamente entre las 10 a.m. y 12 p.m. para que las condiciones de iluminación coincidieran con los tiempos de paso del satélite. El patrón o referencia se obtuvo de un lago cercano al sistema San Lorenzo con una transparencia alta y sin signos visibles de cambio de coloración.

La (Figura 7) muestra los 21 sitios de muestreo en 6 de los lagos que componen el parque:

- **La Encantada (2)**

La encantada 1 (LaE) y La Encantada 2 (LaE2).

- **Bosque azul** (4)

Bosque Azul 1 (BA1), Bosque Azul 2 (BA2), Bosque Azul 3 (BA3) y Bosque Azul 4 (BA4).

- **Paso del soldado - Canal** (2)

Paso del Soldado (PS) y Canal (Canal).

- **Chimpotrero** (2)

Chimpotrero 1 (Ch1) y Chimpotrero 2 (Ch2).

- **Liquidámbar** (3)

Liquidambar 1 (LQ1), Liquidambar 2 (LQ2) y Liquidambar 3 (LQ3).

- **San Lorenzo** (8)

San Lorenzo 1 (SL1), San Lorenzo 2 (SL2), San Lorenzo 3 (SL3), San Lorenzo 4 (SL4), San Lorenzo 5 (SL5), San Lorenzo 6 (SL6), San Lorenzo 7 (SL7) y San Lorenzo 8 (SL8).

Tomando un lago "**Patrón**" de referencia.

Las estaciones o puntos de muestreo van en la secuencia de recorrido de la parte final del sistema (La encantada) hacia el noroeste hasta Liquidámbar

VARIABLES

Se tomaron medidas de transparencia del agua, firmas espectrales de reflectancia y variables físicas del agua (temperatura, conductancia y concentración de O₂ disuelto).

Se tomaron además 3 muestras de 1 litro de agua en cada punto para medir la concentración de clorofila en el laboratorio.



Figura 7 Imagen Spot 6 muestra área de estudio y sitios de muestreo.

IMAGEN SATELITAL SPOT (Satélite Para la Observación de la Tierra)



Figura 8 Satélite SPOT6 y 7 en órbita

Los datos de imágenes de satélite francés SPOT-6 pueden ser adquiridos a través de un proceso de asignación de tareas por satélite.

Este satélite fue lanzado el 9 de septiembre de 2012, se unió a la constelación Pléyades-1A y Pléyades-1B con órbita heliosincrónica, consta de un rango espectral en azul (0.455 m - 0.525 m), verde (0.530 m – 0.590 micras), rojo (0.625 m - 0.695 m) e infrarrojo cercano (0.760 m - 0.890 m) con resolución espacial de 6m y una banda pancromática con resolución de 1.5m, abarcando una extensión de 60x60km con una periodicidad de 3 a 26 días de revista al mismo punto (Satellite Imaging Corporation, 2013).

ESPECTRO RADIÓMETRO USB2000

Construido por la empresa Ocean Optics Inc., el diseño de este instrumento está centrado en la portabilidad de fácil configuración con interfaz a PC y un tiempo de integración de 1 milisegundo a 65 segundos. Sus dimensiones son 89 mm × 64 mm × 34 mm y un peso de 200 g. Este espectro radiómetro cuenta con una entrada USB mediante la cual se puede conectar a una computadora portátil, llevándose a cabo a

través del mismo el control, la obtención de datos y su alimentación eléctrica. El USB2000+ es un aparato, compuesto de monocromador, detector, y sistema de monitorización, diseñado para medir la longitud de onda de la radiación, cuenta con un rango detector de 200-1100 nm y una sensibilidad de 75 fotones / cuenta a 400 nm; 41 fotones / a 600 nm. (OceanOptics, 2013).

El espectrorradiómetro Ocean Optics (Figura 9) funciona en un sistema de muestreo de la siguiente manera:

1. El usuario almacena referencia de una medición oscura para corregir las variables de respuesta del instrumento.
2. La luz se transmite a través de una fibra óptica a la muestra.
3. La luz interactúa con la muestra.
4. Otra fibra óptica recoge y transmite el resultado de la interacción para el espectro radiómetro.
5. El espectrómetro mide la cantidad de luz y transforma los datos recogidos por el espectro radiómetro en información digital.
6. El espectro radiómetro pasa la información de la muestra al programa de interfaz en PC, SpectraSuite.
7. SpectraSuite compara la muestra con la medición de referencia y despliega la información procesada en gráfica y almacena los datos en formato ASCII.

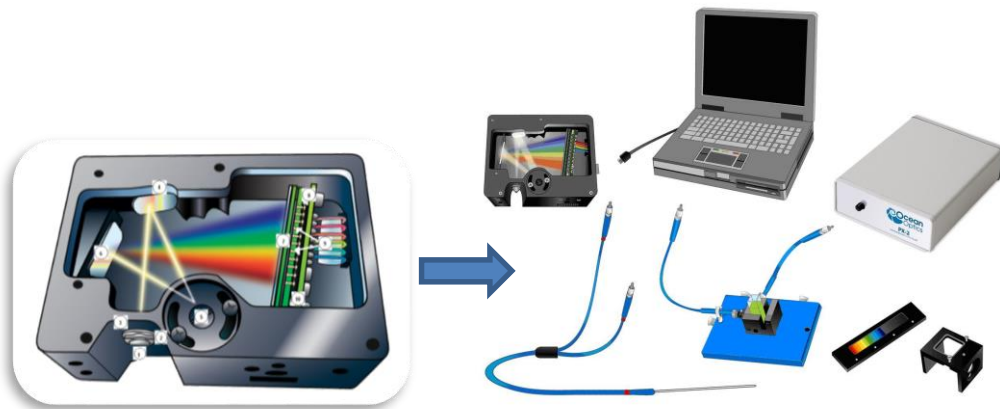


Figura 9 Espectro radiómetro Ocean Optics (Ocean Optics, Inc, 2010).

PERFILADOR BIOSPHERICAL PNF-300

El perfilador PNF-300 es un fluorómetro con sistema óptico integrado diseñado para medir radiación fotosintética disponible (PAR, por sus siglas en inglés) y fluorescencia de fitoplancton estimulado por la luz solar disponible, relacionado con tasa fotosintética y concentraciones de clorofila. La fluorescencia natural de la clorofila “a” se define como el flujo total de luz emitida por clorofila en suspensión de fitoplancton por unidad de volumen bajo la luz del ambiente. Presenta un fácil acceso a los datos en PC con una respuesta espectral de 400 nm a 700 nm en un rango de profundidad de 200m (Biospherical Instruments Inc., 2013)

ESPECTROFLUORÓMETRO

El espectrofluorómetro 10AU TM (Figura 10) es un instrumento portátil de campo que se puede configurar para el monitoreo de flujo continuo o muestras para su análisis. Las mediciones son estables con filtros y lámparas que permiten el cambio rápido de excitación y emisión por lo que puede medir fácilmente diferentes tipos de compuestos tales como algas, feofitinas, clorofila entre otros mediante fluorescencia. (Turnerdesigns, 2015)

Límites de Detección 10AU	
Extraídas clorofila "a"	0,025 g / L usando el método EPA 445.0
Rodamina WT Tinte	0.01 ppb rWT en agua potable
Fluoresceína tinte	0.01 ppb fluoresceína en el agua potable
Extraídas clorofila "a"	0-250 g / L
Rodamina WT Tinte	0-250 ppb
Fluoresceína tinte	0-250 ppb
Especificaciones 10AU eléctricos	
Fuente de luz	Lámpara (4 vatios, 8.000 horas de vida de la lámpara)
Detector	Tubo fotomultiplicador; Estándar (300-650 nm), rojo (185-870 nm)
De alimentación de CA	100-130 V; 200-240 V, 50/60 Hz, 30 vatios
Potencia DC	11-16 V; 2,5 amperios
Salida Digital	100% de salida de datos ASCII a través de RS-232 a 4800 o 9600 bps
Salida analógica	0,1, 1, 2, o 5 voltios
Peso	12,6 kg (28,5 libras)
Altura	24 cm (9,45 pulgadas)
Ancho	55 cm (21,65 pulgadas)
Profundidad	34 cm (13,39 pulgadas)
Temperatura de funcionamiento	0-55 ° C, 32 a 131 ° F (ambiente)



Figura 10 Espectrofluorometro 10-AU

TÉCNICAS

TRANSPARENCIA DEL AGUA

La transparencia del agua se midió con el protocolo del disco de *Secchi* (Preisendorfer, 1986), las variables físicas con una unidad Hydrolab portátil. Las muestras de clorofila fueron filtradas (filtros Whatman de 1cm diámetro) desecadas y etiquetadas. En el laboratorio fueron trituradas en acetona para estimar la concentración de clorofila por medio de un fluorómetro. El índice de estado trófico de Carlson o IET (Índice de Estado Trófico) es uno de los índices más utilizados para evaluar el estado trófico de un cuerpo de agua, es propio para medir el grado de eutrofia en aguas dulces lénticas, se basa en medir transparencia mediante el disco de *Secchi*, clorofila “a” y fósforo total. Este índice puede variar entre 0 (oligotrófico) y 100 (hipereutrófico). Se obtiene a partir de una transformación de la transparencia del DS.

Para cada punto muestreado, se obtuvieron las coordenadas, se tomaron las respuestas espectrales por medio del espectrorradiómetro, los parámetros fisicoquímicos obtenidos con el perfilador hidrolab y muestras de agua superficiales ya que la respuesta espectral es justamente del “espejo de agua” para ser procesadas posteriormente en el laboratorio para la extracción y cuantificación de clorofila.

OBTENCIÓN DE CLOROFILA

Los pigmentos contenidos en el fitoplancton se concentran, por medio de filtrado al vacío dentro de un volumen de agua muestreada. Los pigmentos se extraen con solución de acetona al 90% y con la ayuda de un mortero de tejido mecánico. Se dejan asentar por un mínimo de 2 horas y un máximo de 24, para asegurar la extracción completa de la clorofila “a”. El limo del filtro se centrifuga a 675g por 15 min o a 1000g por 5 min para clarificar la solución. Una porción del sobrenadante se transfiere a una cubeta y se mide la fluorescencia antes y después de acidificarla hasta 0.003 N con ácido clorhídrico 0.1

N. Los factores de calibración para la sensibilidad del aparato se determinan previamente con soluciones de clorofila en concentraciones conocidas. Los resultados se reportan en $\mu\text{g/L}$.

La muestra total del agua se obtuvo en botellas de 1L cada una en la superficie del lago. El fitoplancton saludable se encuentra en la zona fótica de la columna ($>1\%$ irradiancia superficial). Se colectó un volumen de agua suficiente para la preparación de 3 filtros. Se filtró cada muestra de agua al llegar al laboratorio montado en la habitación del hotel, con el fin de evitar cambios en la población, ya que éstos pueden ocurrir en lapsos de tiempo breves. Asimismo, el proceso de filtrado ocurrió bajo la sombra con la menor cantidad de luz. La fuerza del vacío no debe exceder los 20 KPa, mientras que el tiempo de filtrado de una muestra no debe ser mayor a 10 minutos. Esto podría provocar daño en las células y pérdida de clorofila.

Antes de obtener una submuestra se agitó el contenedor principal para suspender las partículas y homogeneizar la emulsión. Se midió el volumen mediante una probeta y se introdujo el volumen en la torre de filtración donde se induce el vacío. Cuando la muestra adquiere un color verde o café es señal de que se ha filtrado un volumen suficiente. Lentamente se libera el vacío al tiempo que el volumen alcanza el nivel del filtro y se libera totalmente cuando el último tanto de agua pasa a través del filtro.

El filtro se remueve de la base con pinzas, se dobla una vez con las partículas dentro y se sacude gentilmente para remover el exceso de humedad. El filtro se colocó en un recipiente de plástico. (Si no se extrae inmediatamente, se debe almacenar en frío a

temperatura de entre -20 y -70 °C. Es aceptable almacenarlo en hielo durante períodos cortos (<2h). Pueden preservarse en oscuridad y frío hasta por 3 y media semanas).

CALIBRACIÓN DEL ESPECTROFLUORÓMETRO

La calibración del espectrofluorómetro se realizó con las soluciones estandarizadas de clorofila y es necesaria siempre que se haya reemplazado alguna de las piezas. Las instrucciones precisas de cómo calibrar el aparato paso a paso se encuentran en Collins y Arar, 1997.

Una vez que el espectrofluorómetro está encendido, éste debe dejarse calentar por 15 minutos, se calibra a cero con la solución de acetona al 90%. El sobrenadante de la muestra extraída se colocó en el tubo, tomando nota del volumen que se añadió, con el fin de agregar la cantidad correcta de ácido. Para un tubo con 5ml se añaden 0.15ml del HCl 0.1N. El nivel de sensibilidad a elegir debe ubicarse en término medio y de ser posible evitar el mínimo de sensibilidad. Si la concentración de clorofila se encontraba en el límite superior o es mayor al 90%, se diluía con acetona al 90% y se reanalizaba. Se registró la medida de fluorescencia y el ajuste de sensibilidad utilizada para cada muestra. Una vez medida, se retiró el tubo del fluorómetro.

ANÁLISIS Y CÁLCULOS

La determinación de Clorofila “a” (sin corregir) se emplea la fórmula:

$$CE,u = Rb \times Fs \quad \text{Ec. 3}$$

CE,u es la concentración sin corregir de Clorofila “a” (µg/L)

R_b es la respuesta fluorescente antes de la acidificación.

F es el factor de sensibilidad, determinada por el tipo de equipo que se maneje.

Para calcular la concentración de clorofila de toda la muestra de agua se extrapola de la siguiente manera:

$$CS_{,u} = \frac{(C_{E,u} \times \text{volumen de extracto (L)} \times DF)}{(\text{Volumen de la muestra (L)})} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde CS_{,u} es la concentración en toda la muestra y DF el factor de dilución.

Para la concentración corregida de clorofila "a" (C_{E,c}) se utiliza la siguiente fórmula:

$$C_{E,c} = F_s(r/r-1)(R_b - R_a) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde F_s es el factor de respuesta al ajuste de sensibilidad S, r es la proporción antes/después de acidificación de la clorofila "a", R_b es la fluorescencia de la muestra antes de acidificarla y R_a es la fluorescencia después de la acidificación. La concentración para el total de la muestra se calcula de forma similar sustituyendo C_{E,u} por C_{E,c}

MÉTODOS DE PRE-PROCESAMIENTO Y CORRECCIÓN DE IMAGEN

Si bien las medidas obtenidas con el radiómetro se pueden considerar como percepción remota ya que el objetivo no está en contacto con el instrumento, uno de los objetivos es demostrar la utilidad y del procedimiento para cuantificar de manera rápida las concentraciones de clorofila para poder extrapolar y continuar el monitoreo para toda el área utilizando imágenes de satélite.

Se descargaron los datos del espectrorradiómetro en archivos ASCII que posteriormente fueron condensados en una base de datos de la cual se separaron las

mediciones de reflectancia en el rango de longitud de onda de 400 a 900nm, se separaron los valores obtenidos de acuerdo a las longitudes de onda correspondientes a las bandas del satélite SPOT 6.

Banda azul 455-525nm, verde 530-590nm, rojo 625-695nm e infrarrojo de 756-880.

Es necesario hacer una serie de procesamientos a las imágenes SPOT para poder obtener valores de reflectancia comparables a los obtenidos con el espectrorradiómetro.

A continuación se describen los procesamientos.

Para poder estimar la concentración de clorofila es necesario transformar los valores digitales de radiancia a valores de reflectancia. La corrección a reflectancia se realizó según el modelo establecido por Schowengerdt (2006):

$$\rho_{\lambda_{\text{Pixel, Band}}} = \frac{L_{\lambda_{\text{Pixel, Band}}} \cdot d_{\text{ES}}^2 \cdot \pi}{E_{\text{sun}}_{\lambda_{\text{Band}}} \cdot \cos(\theta_s)} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde E_{sun} es la irradiancia promedio solar por banda, θ es el ángulo zenith solar, d_{ES} es la distancia entre la tierra y el sol, y L_{λ} la radiancia espectral en el límite atmosférico para cada banda. Teóricamente, el valor derivado de esta operación sería análogo al colectado por el espectrorradiómetro en campo.

Los datos obtenidos se analizaron para ver la consistencia de los mismos algunas relaciones tanto entre los parámetros como su relación espacial y su análisis de una serie de propuestas de índices (referencias) para determinar el que tuviera mejor ajuste estadístico por medio de análisis de regresión en el caso particular de la zona y los datos para poder hacer la relación entre reflectancia, concentraciones de clorofila e índice trófico.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Se promedió la reflectancia medida con el espectrorradiómetro de acuerdo a la longitud de onda por banda del satélite SPOT 6 de 17 de los 21 sitios de muestreo, debido a la depuración de los valores de reflectancia de La encantada 2, Liquidambar 3 y San Lorenzo 3, 6, 7 y 8 no reflejaban mediciones congruentes, tales como valores negativos o en ceros.

Se le asignó una clave por nombre a cada uno de los sitios de muestreo para el mejor control y procesado de los datos (Tabla 1).

LUGAR	CLAVE DEL LUGAR	PROMEDIO B-AZUL	PROMEDIO B-VE	PROMEDIO B-ROJO	PROMEDIO B-IR
La Encantada 1	LaE	22.75	40.64	23.32	4.66
Bosque Azul 1	BA1	5.41	11.81	6.32	3.23
Bosque Azul 2	BA2	13.31	29.58	17.44	8.31
Bosque Azul 3	BA3	4.42	10.31	5.02	1.54
Bosque Azul 4	BA4	6.00	13.70	9.65	3.76
Paso del Soldado	PS	5.20	10.63	5.70	2.37
Canal Bosque Azul-Chimpotrero	Canal	4.80	10.19	3.30	0.22
Chimpotrero 1	Chi1	19.17	33.13	30.32	21.12
Chimpotrero 2	Chi2	7.87	16.07	11.32	2.06
Liquidambar 1	LQ1	5.82	8.40	6.73	0.19
Liquidambar 2	LQ2	0.92	1.21	0.63	1.43
San Lorenzo 1	SL1	1.62	1.84	1.52	1.89
San Lorenzo 2	SL2	1.59	2.00	1.63	0.26
San Lorenzo 4	SL4	2.56	4.50	3.81	-1.29
San Lorenzo 5	SL5	1.71	2.87	1.38	-11.12
Patrón	Patron	1.05	1.12	0.82	0.68

Tabla 1 Promedios de reflectancia para cada sitio de muestreo.

La tabla 2 resume los datos obtenidos por cada sitio muestreado con el perfilador BIOSPHERICAL PNF-300 marcado en color rojo los valores más altos por parámetro y en azul los de menor rango; la columna de clorofila corresponde a los valores obtenidos posteriormente en el laboratorio para las veintiún muestras.

Estación	Profundidad	Temperatura	Conductancia	pH	Oxígeno disuelto %	Oxígeno disuelto	[Chl-a]
unidades	metros	°C	S/cm			mg/l	(µg/L)
La Encantada 1	0	20.6	467	8.43	11.02	147.7	23.6
La Encantada 2	0	21.28	473.2	8.03	9	122.2	23.8
Bosque Azul 1	0	21.77	530.7	8.37	10.93	150	27
Bosque Azul 2	0	22.64	573.1	8.25	10.1	140.9	30.1
Bosque Azul 3	0	22.54	590.2	8.4	10.95	152.6	36.1
Bosque Azul 4	0	22.84	581	8.44	12.44	174.4	48
Paso del Soldado	0	23.67	587.5	8.35	11.02	156.8	34.3
Canal	0	22.32	704.7	8.26	11.33	157.2	63.5
Chimpotrero 1	0	22.84	709.6	8.52	13.32	186.7	65
Chimpotrero 2	0	21.17	714.7	8.22	11.19	151.8	79
Liquidámbar 1	0	22.54	974	8.61	24.53	342.1	126.3
Liquidámbar 3	0	22.26	924.7	8.44	19.05	264.2	83.6
San Lorenzo 1	0	22.37	845	8.46	17.64	245.1	167.4
San Lorenzo 2	0	19.72	810	8.42	7.8	118.2	119.1
San Lorenzo 3	0	21.79	714.3	8.34	12.99	178.3	77.9
San Lorenzo 4	0	20.95	815.3	8.09	12.15	164.2	69.3
San Lorenzo 5	0	19.74	794.8	8.17	9.45	124.6	74.7
San Lorenzo 6	0	19.61	799	8.06	8.84	116.5	79.4
San Lorenzo 7	0	19.27	818.4	7.7	5.05	65.9	67
San Lorenzo 8	0	19.04	808.1	7.87	7.6	98.8	60.9
Patrón	0	19.99	503.4	7.86	6.81	90.1	0.9

Tabla 2 Condiciones del agua y concentración de Clorofila - "a" en cada uno de los puntos de muestreo.

En el análisis de los datos de menor a mayor en profundidad cero de temperatura fueron San Lorenzo 8 y Paso del Soldado respectivamente, en pH San Lorenzo 7 obtuvo el mayor valor con 7.70 (casi neutro) y el menor, Liquidámbar 1 con 8.61 (alcalino). El oxígeno disuelto y el porcentaje de oxígeno disuelto tuvo la misma tendencia de menor a mayor en San Lorenzo 7 y Liquidámbar 1 respectivamente. La menor concentración de clorofila se presentó en el Lago Patrón con 0.9 µg/L y la mayor concentración en San Lorenzo 1 con 167.4 µg/L.

Se realizaron mapas de pH (Figura 11), Oxígeno disuelto (Figura 12), Conductancia (Figura 13) y concentración de Chl-a (Figura 14), en una paleta de colores de verde a rojo con los valores de menor a mayor para una mejor apreciación de la distribución espacial omitiendo la variable de temperatura ya que ninguna de las mediciones fue tomada en el mismo horario.

La Figura 11 muestra la distribución espacial de los valores de pH los cuales están en rango de alcalinidad, verde corresponde al rango de alcalino o cercano a neutro, los valores de 8.1 a 8.3, en amarillo y de 8.4 a 8.6 en rojo corresponde a los valores de incremento de la alcalinidad, para una mejor apreciación de rango.

Los mapas de las Figuras 12, correspondiente a los valores de oxígeno disuelto, 13 de valores de conductancia y 14 de concentración de clorofila "a" se agregaron simbologías gama de colores de verde (menor) a rojo (mayor), para ejemplificar la distribución espacial.

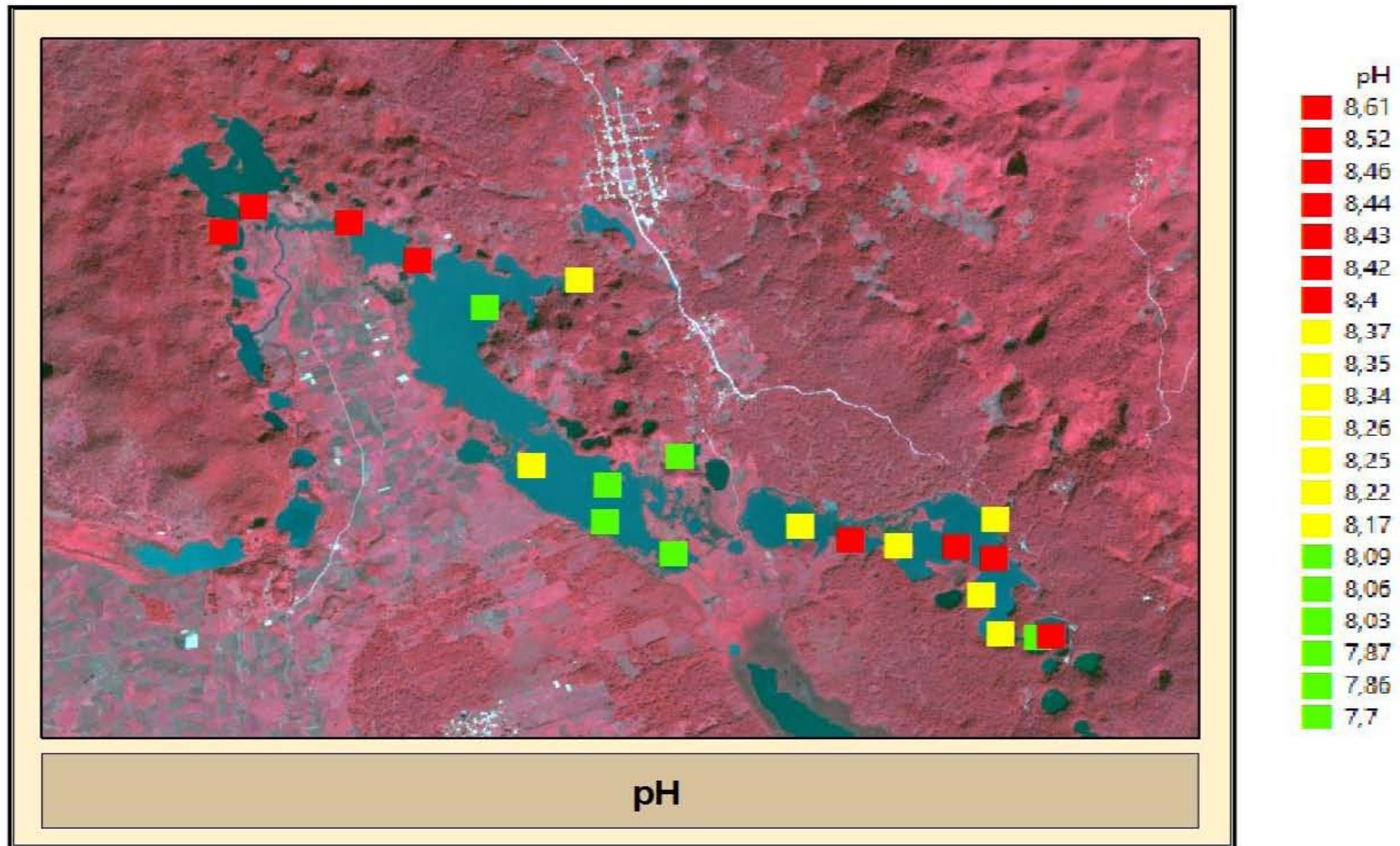


Figura 11 Mapa de valores de pH

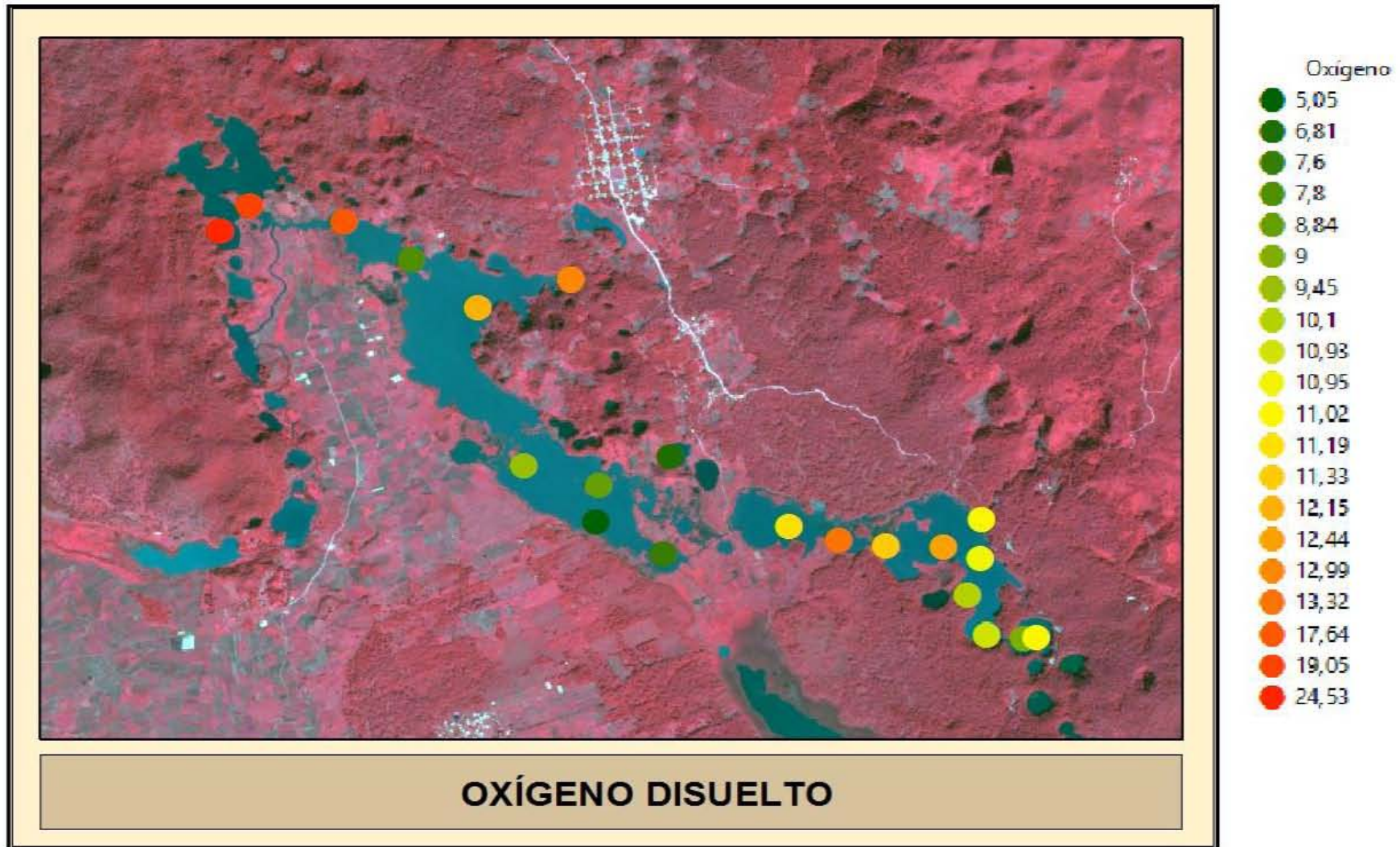


Figura 12 Mapa de valores de porcentaje de Oxígeno disuelto

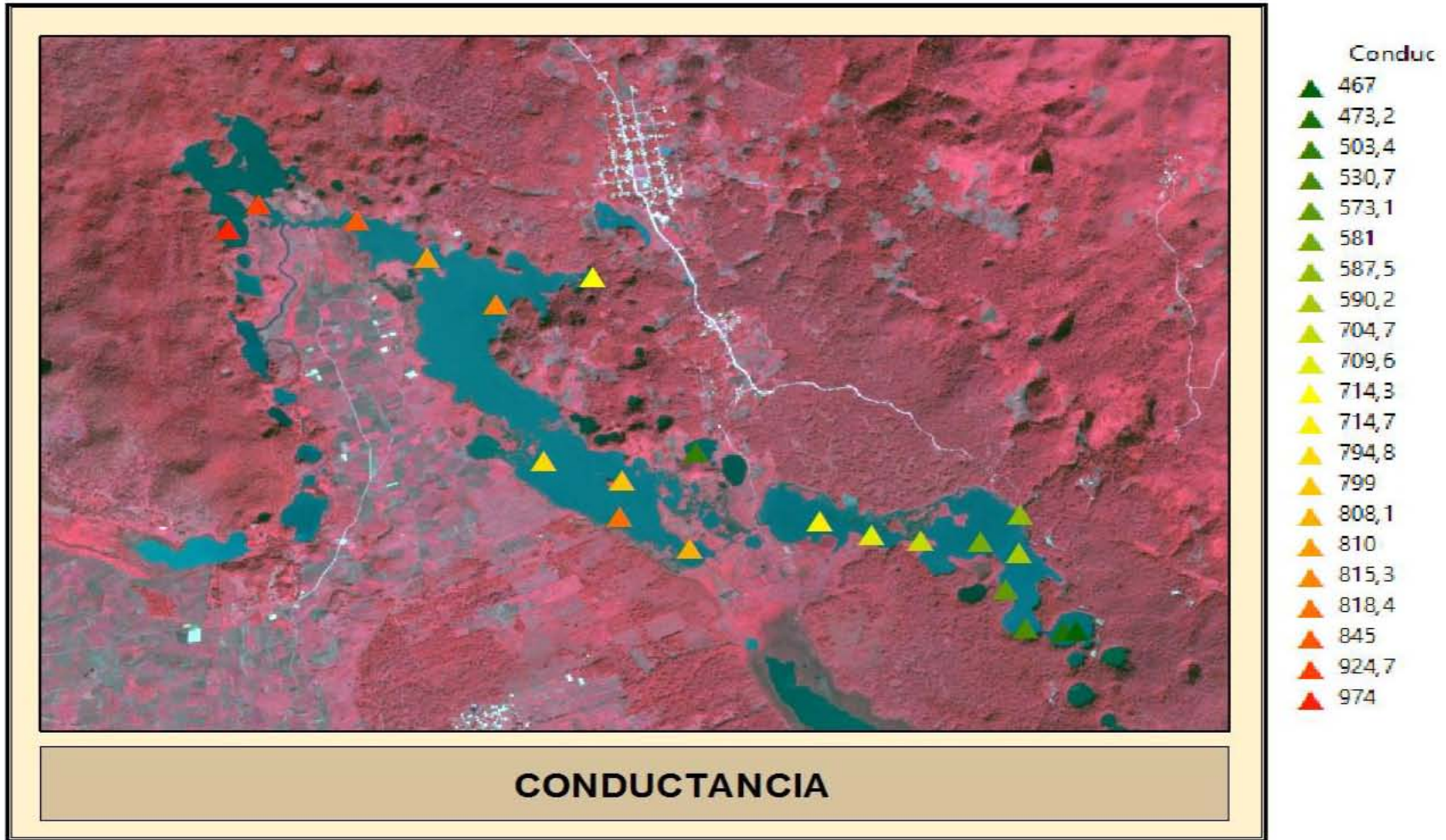


Figura 13 Mapa de valores de conductancia

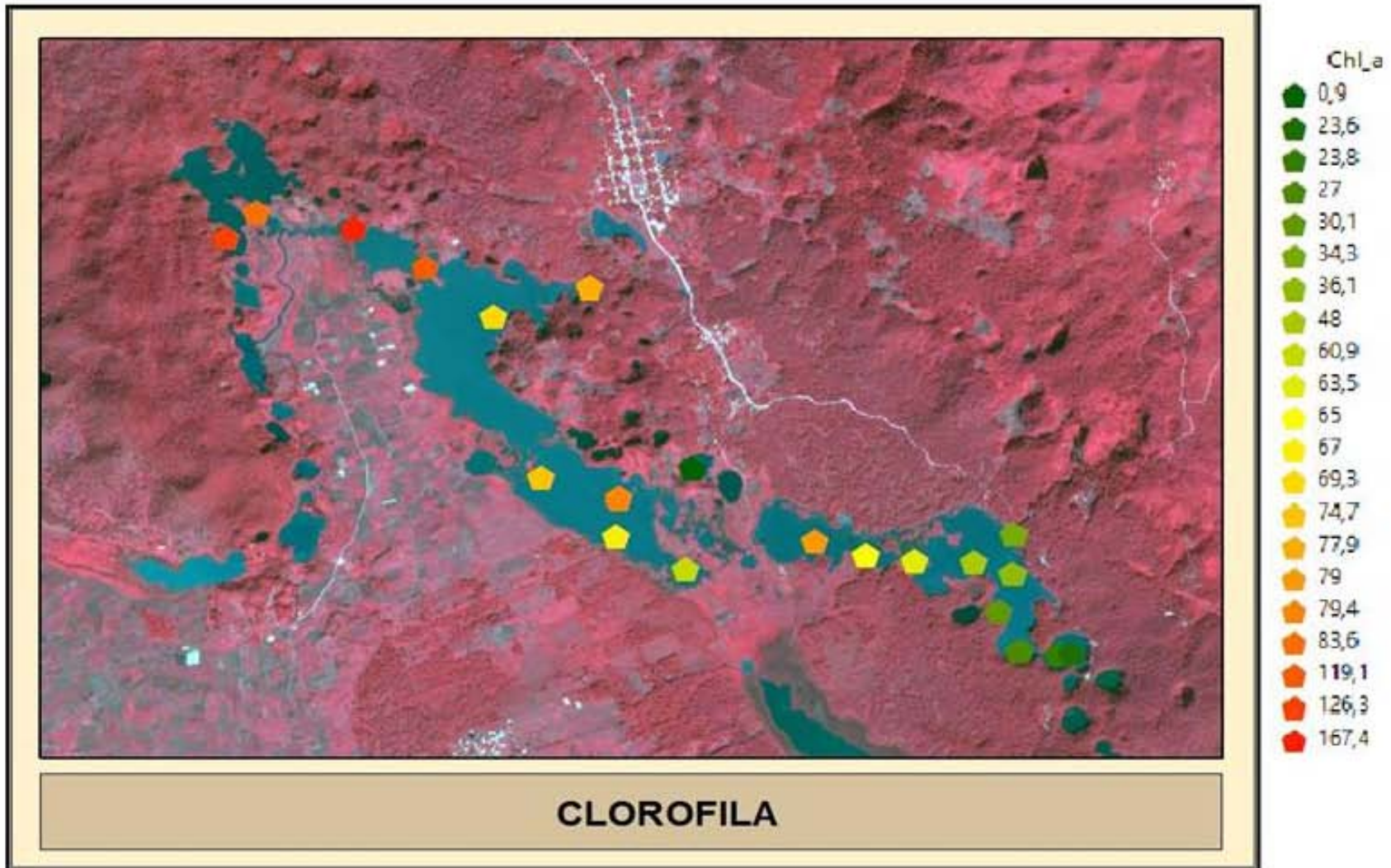
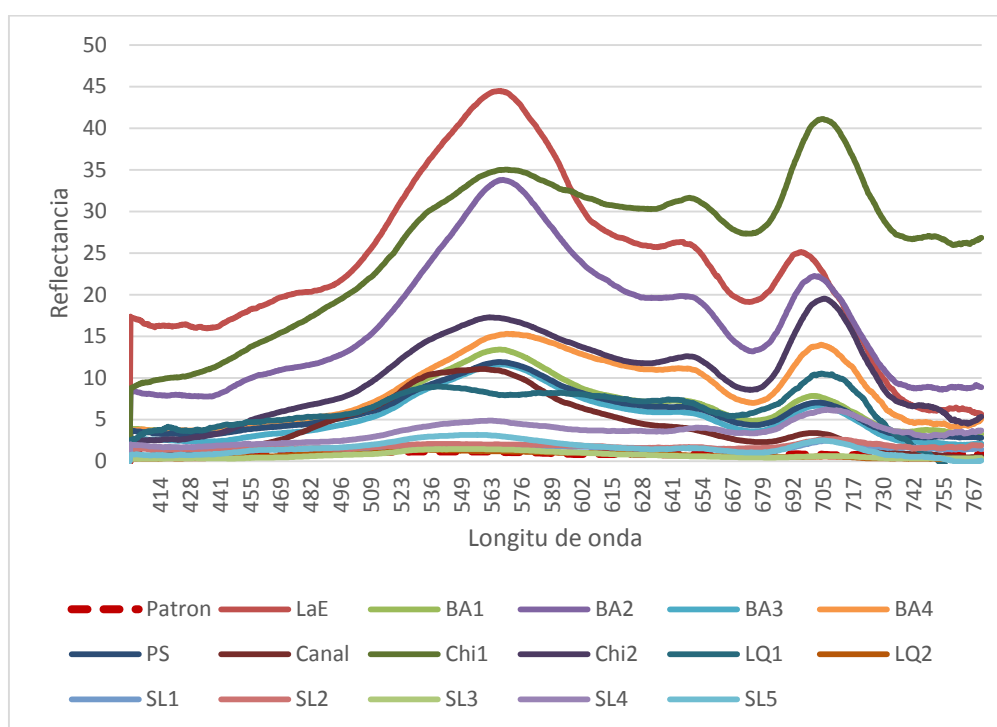


Figura 14 Mapa de valores de la concentración de Clorofila "a"

Se obtuvieron las firmas espectrales de 16 de los 21 sitios y la firma patrón que se obtuvo con el espectrorradiómetro Ocean Optics. Dichas firmas se muestran en la Gráfica 1.



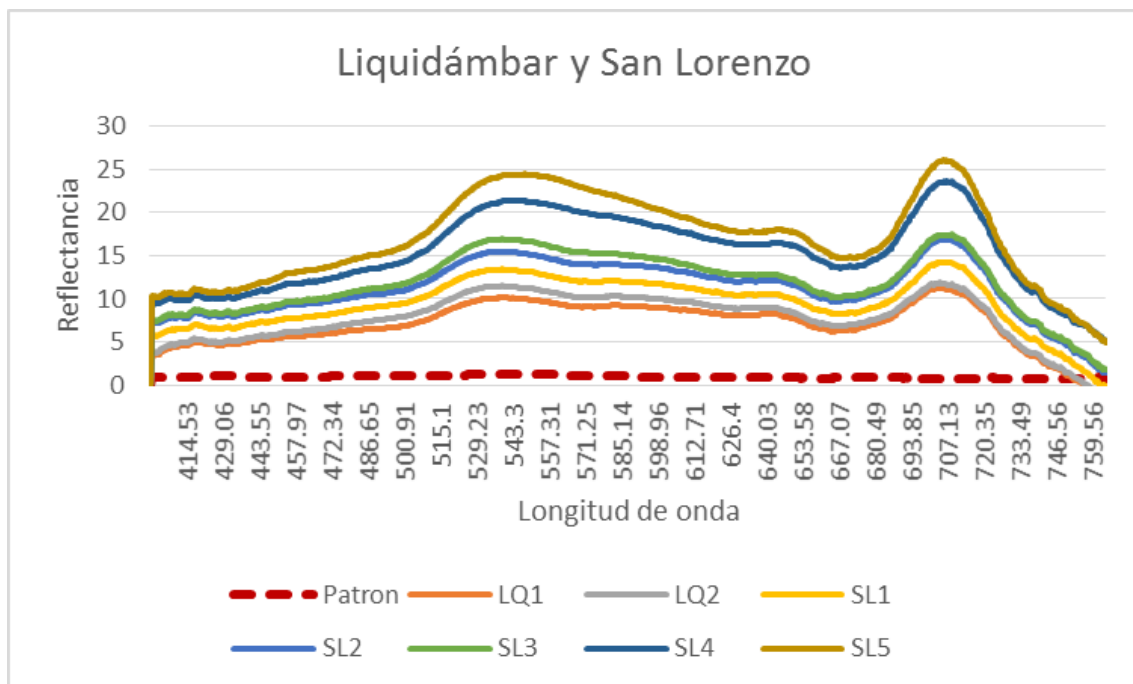
Gráfica 1 Firmas espectrales de 16 de los 21 sitios y firma patrón.

Los lagos: La Encantada, Bosque Azul y Chimpotero presentaron señales de reflectancia más intensas, así como de picos más pronunciados en las regiones del espectro correspondientes a la fotosíntesis. Las firmas espectrales de los sitios concuerdan con los patrones de absorción de la clorofila, principalmente los picos correspondientes a la banda roja.

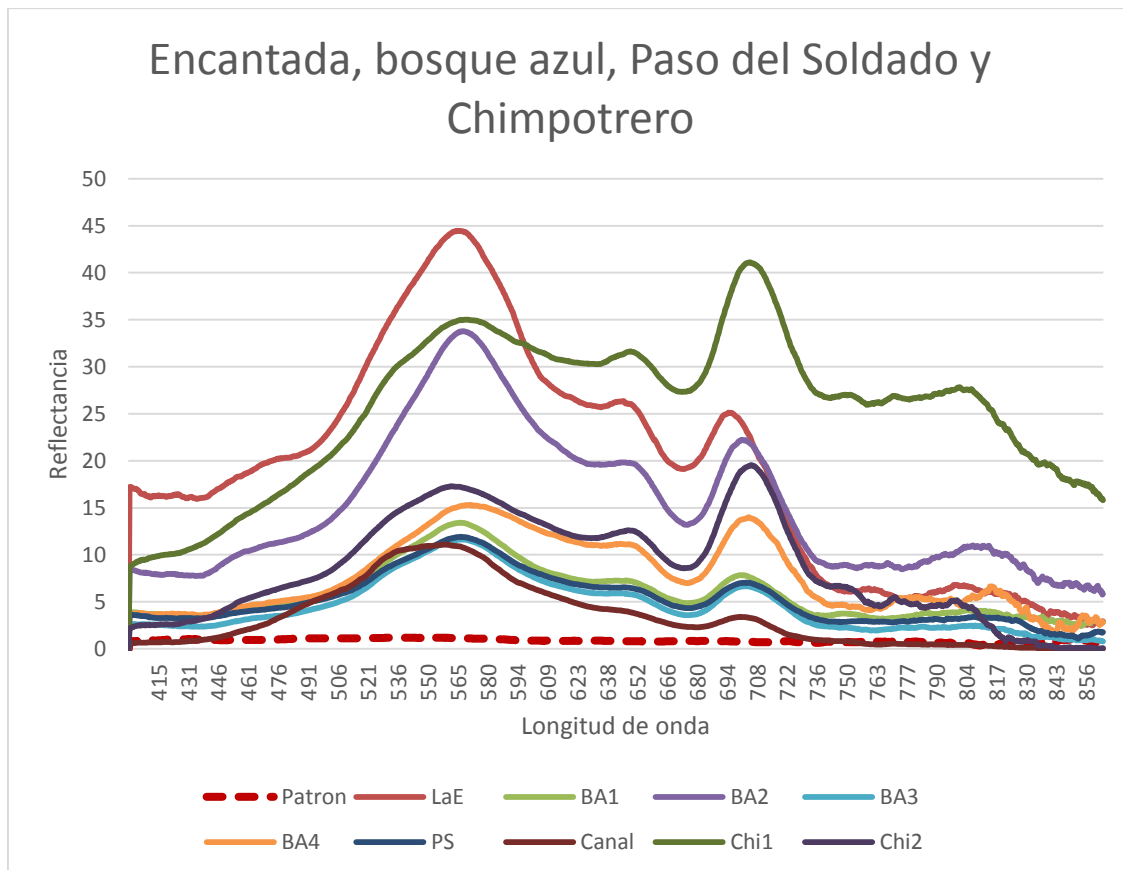
En la banda verde, el porcentaje de reflectancia se acerca al 50% y presenta un pico en los 560nm, a excepción del sitio LQ1 donde se aprecia un mínimo en la curva. La banda roja presenta el patrón típico de la fotosíntesis un pico de absorción en los 675nm e inmediatamente un pico de emisión en los 685nm provocado por la fluorescencia.

La mayor concentración de clorofila se detectó en el lago Liquidámbaer cuyos 3 sitios de muestreo contenían más clorofila que el resto de la población siguiendo una tendencia a disminuir hacia el lago San Lorenzo. El sitio con menor concentración fue La Encantada que se encuentra al final del sistema.

Se separaron en dos grupos de firma espectral en rangos similares para su mejor apreciación y comparación con la firma espectral del lago tomado como patrón en las gráficas 2 y 3.



Gráfica 2 Firma espectral de Liquidambar y San Lorenzo.



Gráfica 3 Firma espectral de La Encantada, Bosque Azul, Paso del Soldado, Canal y Chimpotrero.

Como se comentó con anterioridad, diversos autores han propuesto clasificaciones basadas en algunas características que permitan la jerarquización de los ecosistemas acuáticos. Dentro de estos destaca el que clasifica a los sistemas acuáticos en diversos estados tróficos en función de su contenido de nutrientes, ya que comúnmente han sido tomados para tipificar a lagos en latitudes templadas (Contreras, 1994).

Uno de los intentos más conocidos de clasificación trófica en sistemas acuáticos fueron los de Carlson (1977), quien sugirió jerarquizaciones en función de la penetración de la luz (transparencia del disco de Secchi), la cantidad de fósforo total y la presencia de clorofila “a” en el agua. (Ortiz, 2006). La tabla 3 muestra los valores de transparencia de disco de Secchi para los sitios muestreados.

Clave_lugar	Latitud	Longitud	Hora	Fecha de muestreo	DS (cm)
lae1	16.1204167	-91.7283	9:56	5.02.14	98
LaE	16.1203167	-91.7292667	10:56	5.02.14	98
BA1	16.1206	-91.7318667	11:08	5.02.14	90
BA2	16.12365	-91.7332167	11:24	5.02.14	81
BA3	16.1264167	-91.7323167	11:35	5.02.14	77
BA4	16.1273167	-91.73495	12:01	5.02.14	75
PS	16.1294667	-91.7321833	12:54	5.02.14	75
Canal	16.1275	-91.7391	13:25	5.02.14	70
Chi1	16.1279167	-91.7424833	13:40	5.02.14	64
Chi2	16.1289667	-91.7460333	13:53	5.02.14	56
LQ1	16.1519	-91.7866	11:06	6.02.14	65
LQ2	16.1568	-91.7843167	11:29	6.02.14	49
lq3	16.1538333	-91.7844833	12:02	6.02.14	55
SL1	16.1525667	-91.77775	12:30	6.02.14	49
SL2	16.1496333	-91.7728833	12:47	6.02.14	49
SL3	16.14805	-91.7614667	13:16	6.02.14	60
SL4	16.1460333	-91.7682	13:43	6.02.14	52
SL5	16.13375	-91.76495	10:35	8.02.14	56
SL6	16.1322167	-91.75955	10:49	8.02.14	60
sl7	16.1294667	-91.7597833	11:00	8.02.14	61
sl8	16.1269167	-91.7549667	11:19	8.02.14	60
Patron	16.1344667	-91.75445	13:00	8.02.14	600

Tabla 3 Coordenadas geográficas, hora, fecha de muestreo y valores de transparencia de Disco de Secchi para cada sitio.

Se utilizó la Ecuación 1 y 2 para la obtención del Índice de estado trófico de Carlson y la ecuación 4 de extrapolación de la concentración de clorofila se obtuvo las siguientes tablas.

CLAVE_LUGAR	DS (m)	[Clorofila A]	IET [CL - A]	IET DS
Patron	6	0.89	29.39	34.15
LaE	0.98	23.84	61.68	60.29
BA1	0.9	27	62.9	61.52
BA2	0.81	30.08	63.96	63.04
BA3	0.77	36.08	65.75	63.77
BA4	0.75	48.03	68.55	64.15
PS	0.75	34.27	65.24	64.15
Canal	0.7	63.52	71.3	65.15
Chi1	0.64	64.99	71.52	66.44
Chi2	0.56	79.04	73.44	68.37
LQ1	0.65	126.3	78.04	66.21
LQ2	0.49	184.5	81.76	70.29
SL1	0.49	167.37	80.8	70.29
SL2	0.49	119.08	77.46	70.29
SL3	0.6	77.88	73.29	67.37
SL4	0.52	69.29	72.15	69.43
SL5	0.56	74.66	72.88	68.37

Tabla 4 Valores de DS y Cl a obtenidos y valores Estado Trófico.

Las categorías del índice de estado trófico de Carlson se agruparon en el siguiente orden:

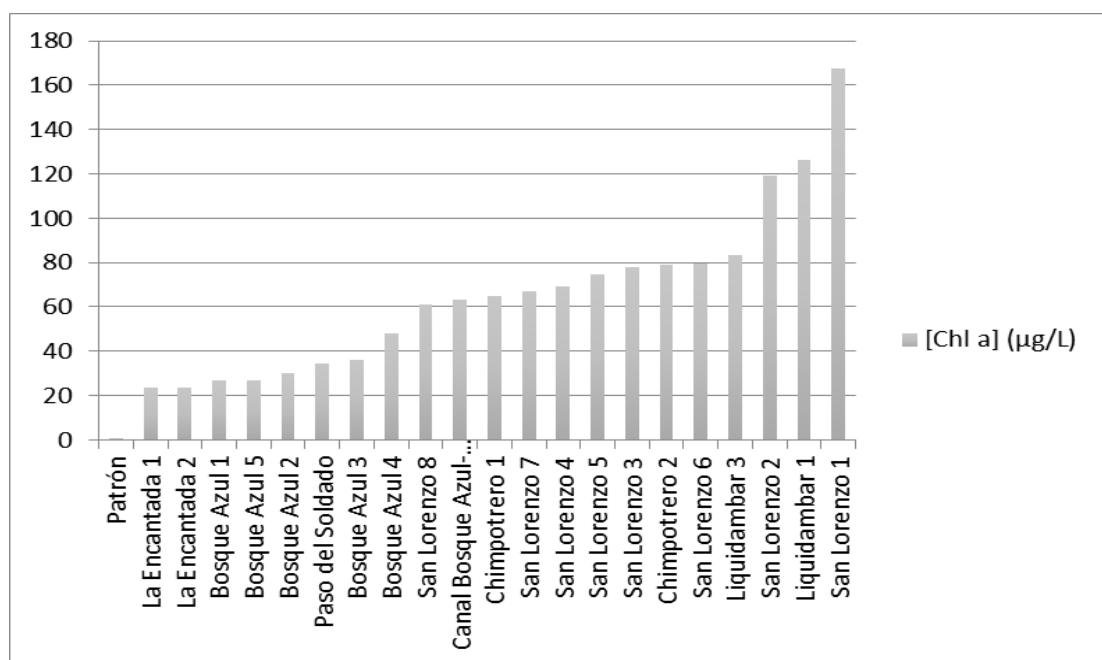
CLAVE_LUGAR	IET DS	IET
Patron	34.15	Mesotrófico
LaE	60.29	Mesotrófico
BA1	61.52	Eutrófico
BA2	63.04	Eutrófico
BA3	63.77	Eutrófico
PS	64.15	Eutrófico
BA4	64.15	Eutrófico
Canal	65.15	Eutrófico
LQ1	66.21	Eutrófico
Chi1	66.44	Eutrófico
SL3	67.37	Eutrófico
SL5	68.37	Eutrófico
Chi2	68.37	Eutrófico
SL4	69.43	Eutrófico
SL2	70.29	Eutrófico
SL1	70.29	Eutrófico
LQ2	70.29	Eutrófico

Tabla 7 Categorías de IET de acuerdo a los valores de Disco de Secchi

CLAVE_LUGAR	IET [CL - A]	IET
Patron	29.39	Oligotrófico
LaE	61.68	Eutrófico
BA1	62.9	Eutrófico
BA2	63.96	Eutrófico
PS	65.24	Eutrófico
BA3	65.75	Eutrófico
BA4	68.55	Eutrófico
Canal	71.3	Eutrófico
Chi1	71.52	Eutrófico
SL4	72.15	Eutrófico
SL5	72.88	Eutrófico
SL3	73.29	Eutrófico
Chi2	73.44	Eutrófico
SL2	77.46	Eutrófico
LQ1	78.04	Eutrófico
SL1	80.8	Eutrófico
LQ2	81.76	Eutrófico

Tabla 6 Categorías de IET de acuerdo a los valores de con Clorofila "a"

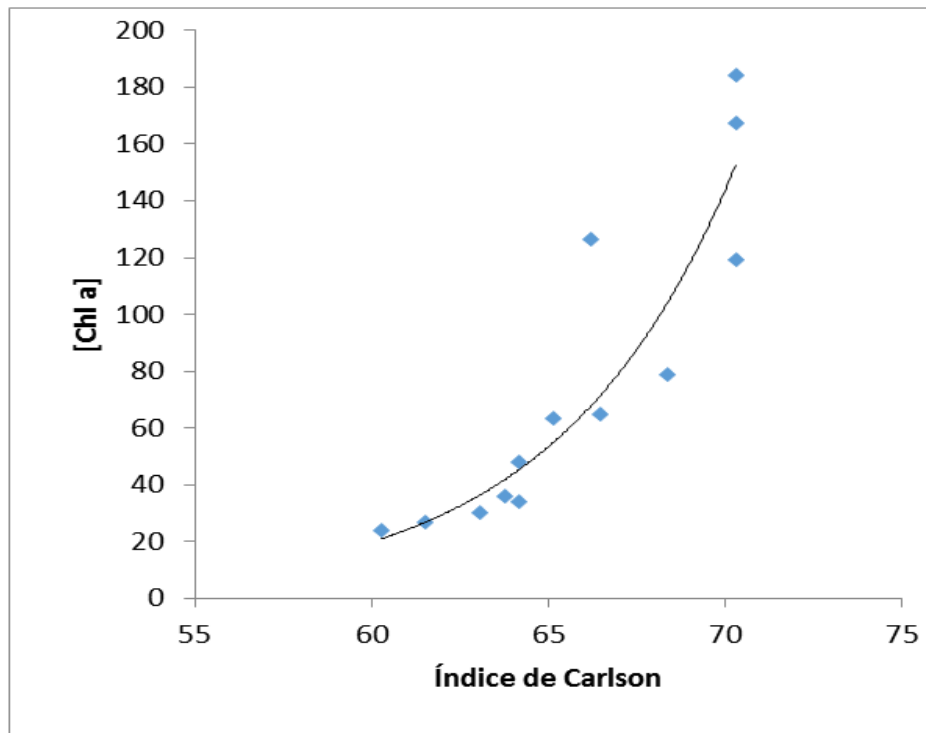
Se categorizó el IET de Disco de Secchi (Tabla 5) y la concentración de Cl-a (Tabla 6) obteniendo para 15 de los 17 lagos muestreados el estado de Eutrofía y en el caso de La Encantada y el lago Patrón en la evaluación con Disco de Secchi, estado de Mesotrofía a diferencia de la Oligotrofía que presenta con IET de [Cl-a].



Gráfica 4 Concentración de clorofila en cada estación.

La Gráfica 4 indica que el lago Patrón tiene la menor concentración de clorofila “a” con un valor de 0.89 ($\mu\text{g/L}$) y el lago San Lorenzo 1 tiene la mayor concentración con 167.4($\mu\text{g/L}$).

El índice de Carlson muestra una tendencia a aumentar exponencialmente en relación a las concentraciones de clorofila con un valor de $r^2 = 0.78$ como se aprecia en la Gráfica 5 resultado de aplicar las ecuaciones 1 y 2 con los datos de campo.

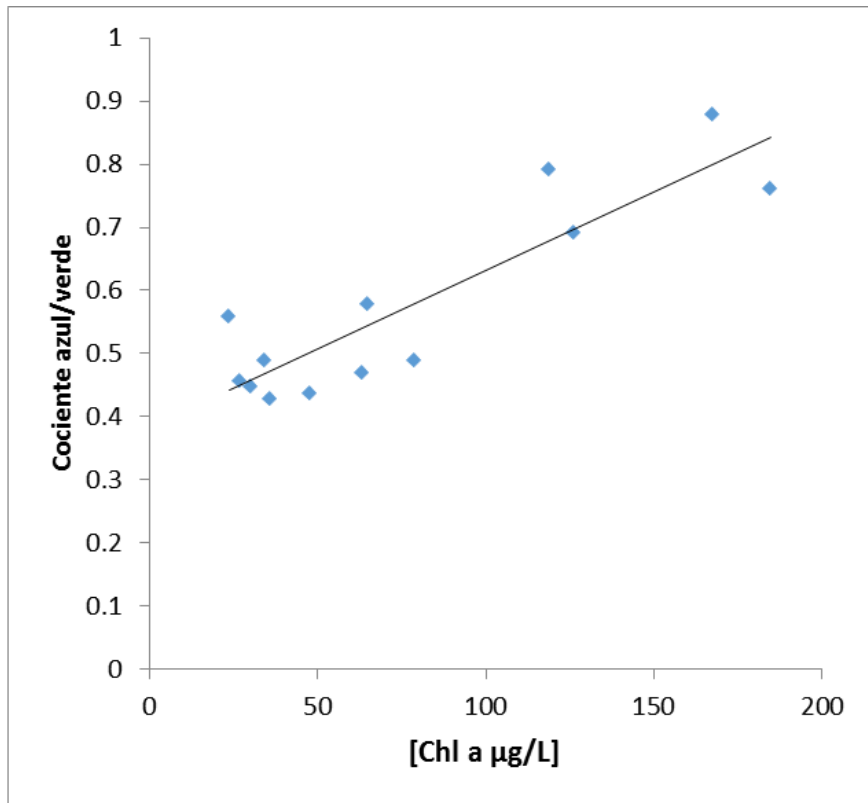


Gráfica 5 Índice de Carlson y concentración de clorofila "a".

Marcando las mayores concentraciones en los lagos Liquidámbar y San Lorenzo (en los respectivos puntos y orden de muestreo) ubicados al norte del Parque Nacional y las menores al sur del mismo.

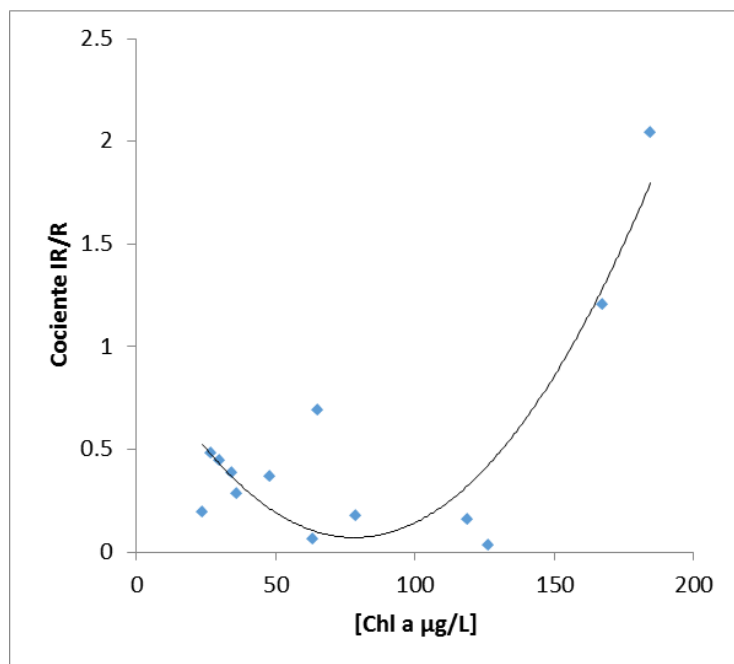
Se aplicó el método basado en el supuesto de parámetros ópticos de clorofila y fluorescencia propuesto por Zimba y Gitelson (2006).

El cociente entre las banda verde y azul mostró patrones consistentes con el aumento en la concentración de clorofila. La relación es aproximadamente lineal ($r^2 = 0.78$) como se muestra en la Gráfica 6.



Gráfica 6 Cociente azul/verde y concentración de clorofila.

El índice Infrarrojo-Rojo también sugerido en la literatura de Zimba y Gitelson, (Gráfica 7), presenta una $r^2=0.4$ con un ajuste de una función no lineal.



Gráfica 7 Relación entre el cociente rojo/infrarrojo y la concentración de clorofila.

Se realizó una comparación con la información de la imagen de satélite, calculando los valores de reflectancia a partir de las bandas de radiancia del satélite SPOT 6. Para cada una de las bandas espectrales, obteniendo como resultado una subimagen de cada una de ellas, las cuales abarcan únicamente la zona de los lagos aplicando una máscara para trabajar exclusivamente con los lagos, tal como se muestra en las Figuras 15 a 18.

Se pueden observar ligeras variaciones en los lagos para cada una de las bandas principalmente en el sistema San Lorenzo y el contraste con Liquidámbar. Como es de esperar, el agua absorbe la radiación infrarroja y en consecuencia los valores son muy bajos y los lagos se ven prácticamente negros.

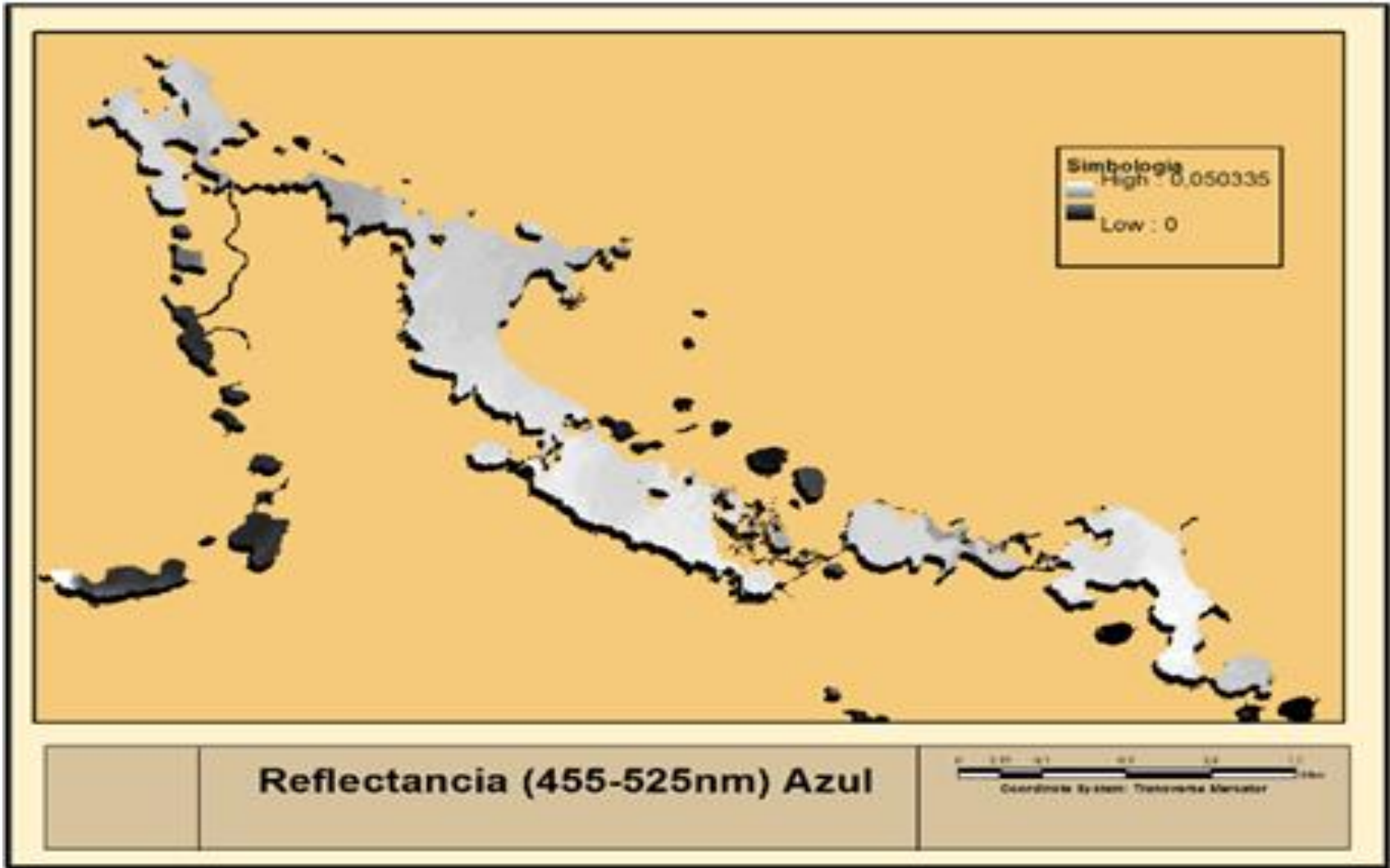


Figura 15 Máscara de reflectancia de la banda azul

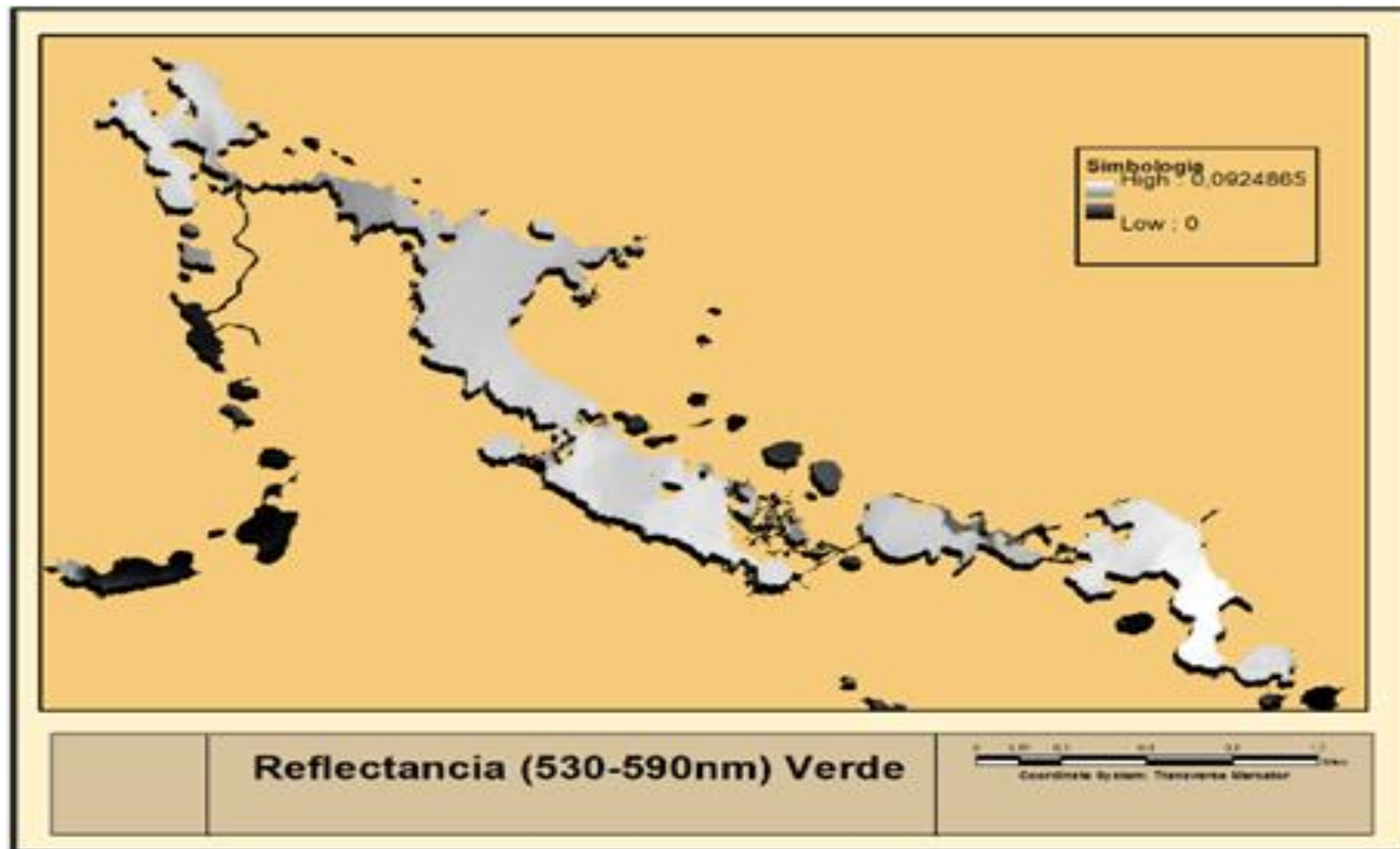


Figura 16 Máscara de reflectancia de la banda verde

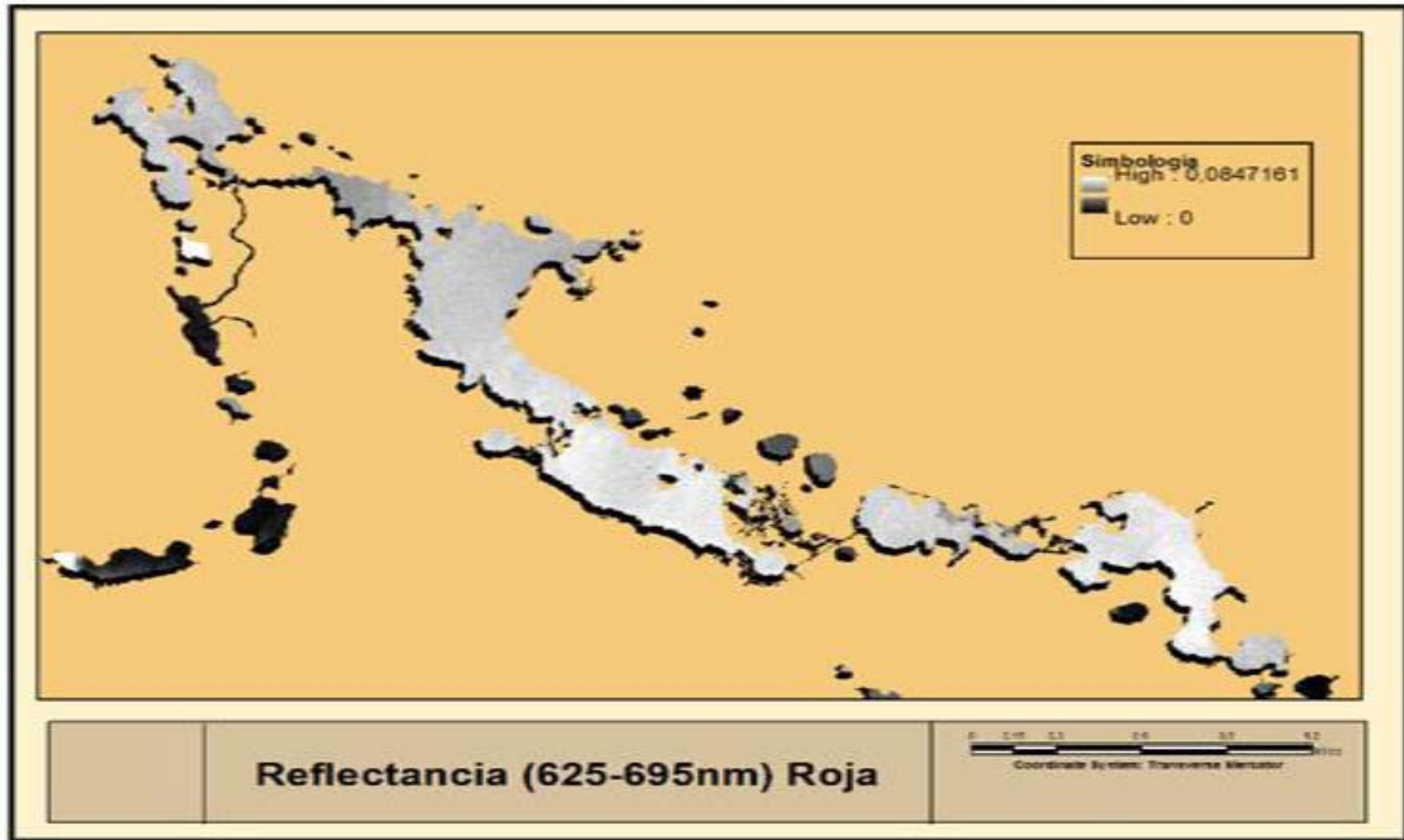


Figura 17 Máscara de reflectancia de la banda roja

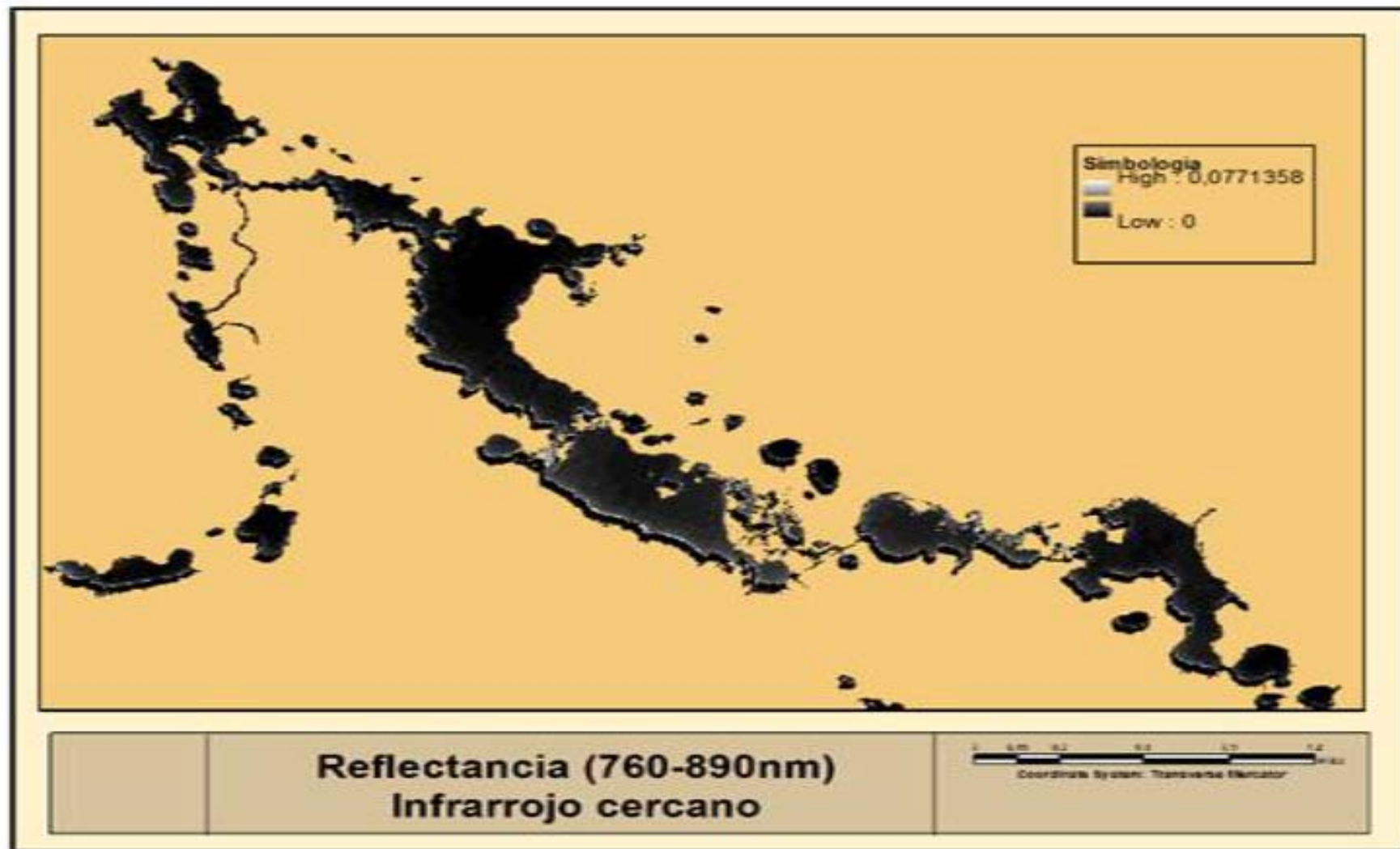


Figura 18 Máscara de reflectancia de la banda de infrarrojo cercano

Para analizar el comportamiento de cada banda con lo obtenido por el espectrorradiómetro, se obtuvieron los valores de pixel de la imagen satelital SPOT 6 para cada punto muestreado por banda para compararlos con los valores de clorofila. (Tabla 7). De la misma manera que se hizo con los promedios de bandas utilizando el espectrorradiómetro para los índices verde-azul e infrarrojo-rojo al igual que los resultados promedio, la mayor correlación fue para el índice verde-azul.

CLAVE_LUGAR	Co R-IR	CoVerde-Azul	B1_valor Px	B2_valor Px	B3_valor Px	B4_valor Px
Patron	0.8317	0.9390	0.0039	0.0378	0.0598	0.0000
LaE	0.1997	0.5599	0.0271	0.0799	0.0731	0.0023
BA1	0.5118	0.4575	0.0323	0.0883	0.0747	0.0117
BA2	0.4763	0.4498	0.0271	0.0715	0.0714	0.2150
BA3	0.3076	0.4285	0.0336	0.0883	0.0781	0.0070
BA4	0.3893	0.4380	0.0310	0.0827	0.0747	0.0047
PS	0.4162	0.4891	0.0310	0.0841	0.0764	0.0093
Canal	0.0669	0.4707	0.0310	0.0687	0.0731	0.1239
Chi1	0.6966	0.5786	0.0284	0.0715	0.0714	0.0140
Chi2	0.1821	0.4897	0.0297	0.0771	0.0731	0.0093
LQ1	0.0276	0.6922	0.0297	0.0799	0.0731	0.0070
LQ2	2.2592	0.7627	0.0284	0.0785	0.0731	0.0023
SL1	1.2458	0.8788	0.0232	0.0631	0.0681	0.0070
SL2	0.1594	0.7928	0.0284	0.0757	0.0731	0.0070
SL3	6.5892	0.5133	0.0052	0.0336	0.0532	0.0187
SL4	-0.3400	0.5695	0.0271	0.0757	0.0714	0.0023
SL5	-8.0855	0.5961	0.0323	0.0827	0.0764	0.0117

Tabla 8 Valores de Pixel por banda y cocientes.

Las Figuras 19 y 20, muestran el resultado de dichos cocientes para la zona de estudio y que de alguna manera muestran las diferencias que tiene el agua en los cuerpos de agua.

Dada la relación obtenida en los promedios de bandas, se podría estimar la concentración de clorofila en toda la imagen.

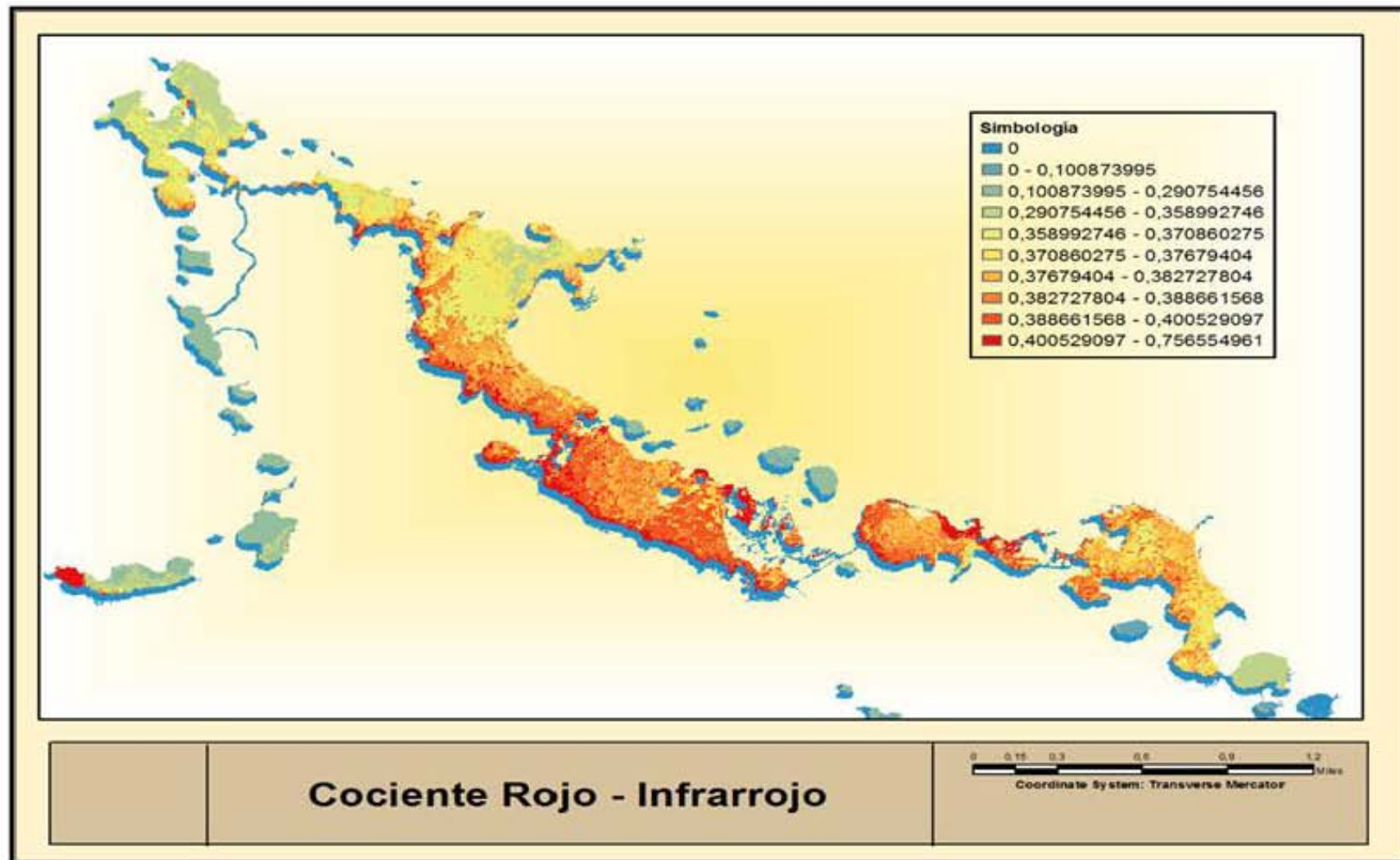


Figura 19 Mapa del cociente Rojo-Infrarrojo

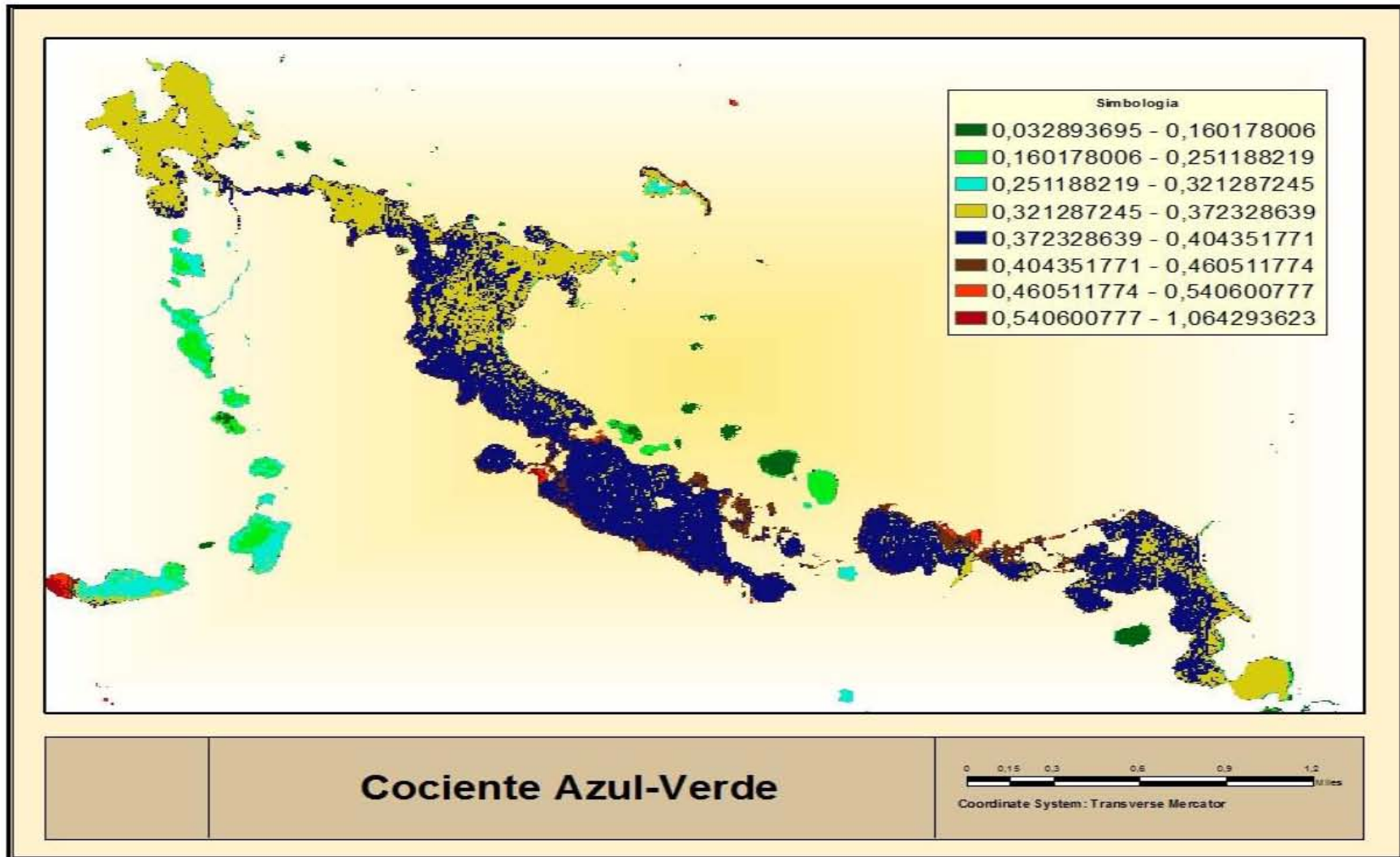


Figura 20 Mapa cociente Azul-Verde

Se aplicó el modelo para la obtención del cociente con las bandas. Se realizó una comparación de los rangos del cociente Azul-verde con los resultados de la Gráfica 6 la cual muestra la mayor densidad de puntos entre 0.4 y 0.6 arrojando una r^2 de 0.78, con los rangos del histograma del mapa del cociente Azul-Verde (Figura 20) en el cual se observa que la distribución de los valores está concentrada entre 0.3 y 0.5 (Figura 21) si bien el rango es menor también coincide con el grupo de puntos de la gráfica.

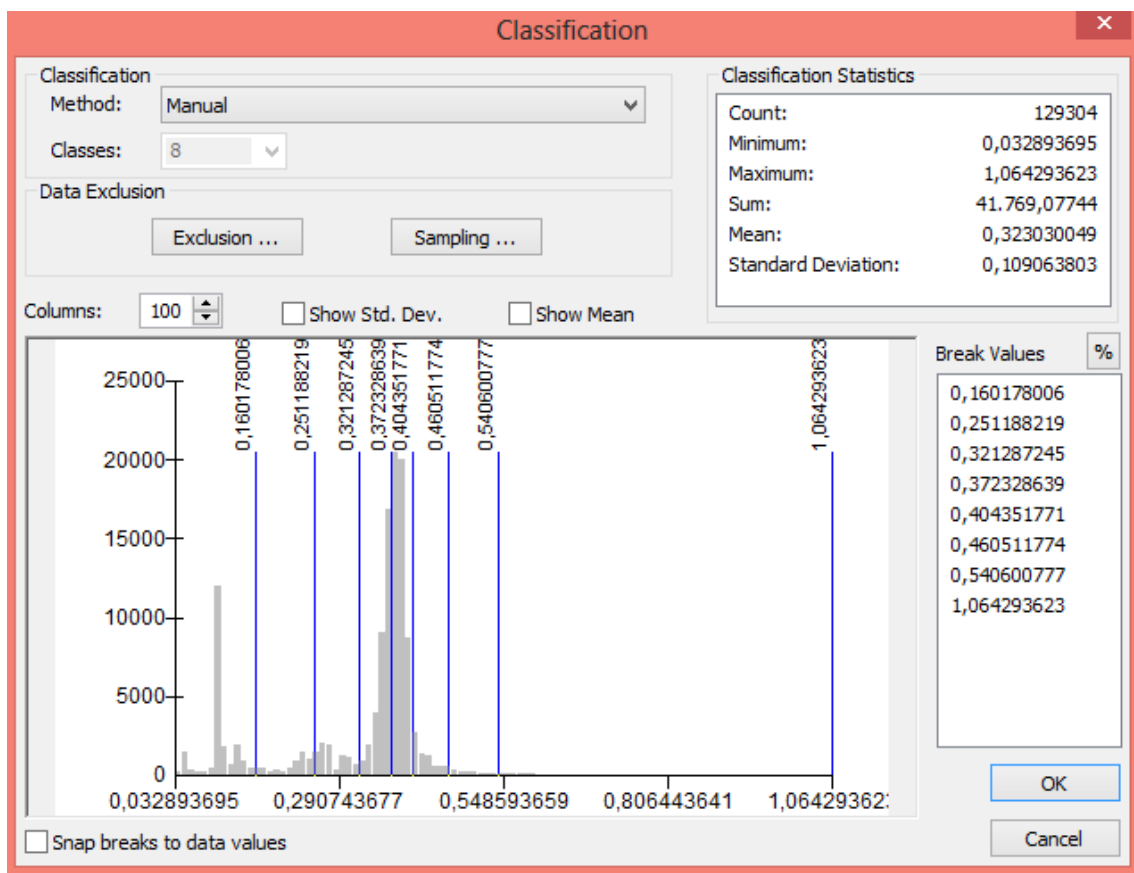


Figura 21 Histograma de la imagen del cociente Azul-Verde

Las diferencias se pueden deber a diversos factores en la imagen incluida la fecha de toma, pero aproxima la concentración de clorofila y las diferencias espaciales de su distribución.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

En la banda azul, la penetración en el agua es máxima, por lo que los picos de absorción quedan ocultos por la absorción intrínseca del agua. Aun así en los sitios con mayor respuesta se aprecia un aumento en la reflectancia a partir de los 450 nanómetros y que aumenta significativamente conforme se acerca a la región verde del espectro, color característico de la clorofila, lo que indica que la fotosíntesis también tiene efecto en bandas de alta absorción.

El índice trófico de Carlson se ajusta a la concentración de clorofila, aumentando exponencialmente. La luz se atenúa de forma exponencial conforme aumenta la profundidad (Kirk, 1994). En teoría, esta atenuación del agua está afectada por las propiedades ópticas aparentes e inherentes de la misma. Las últimas están determinadas por las relaciones angulares de la luz dentro del medio, que a su vez están determinadas por la materia orgánica particulada y disuelta, lo cual se traduce en distintos grados de transparencia.

Los datos del índice de Carlson muestran que el efecto de turbidez que provocan las partículas fotosintéticas suspendidas aumenta no-linealmente conforme el número aumenta, es decir, dentro de un rango específico, los cambios mínimos en la concentración, disminuyen en gran medida la transparencia del agua. Ecológicamente, un sistema lacustre en estas condiciones es altamente inestable. La reducción drástica de la transparencia del agua tiene efectos importantes sobre la dinámica del sistema, provocando cambios en las demás variables físicas (Desortová, 1981).

Desafortunadamente, la mayoría de los sitios muestreados en las lagunas de Montebello se encuentran en esta situación. Los resultados del índice de Carlson demuestran por

qué es uno de los indicadores más fiables para estudiar el estado trófico de los cuerpos de agua, ya que cumplen cabalmente con lo esperado.

Este aumento en la concentración de clorofila debería ir acompañado con un aumento en los valores de reflectancia del color verde, sin embargo, esto no se observa con claridad al momento de relacionar los valores promediados de la banda verde con la concentración de clorofila (Tabla 7). Los valores de la región verde incluso disminuyen al aumentar la concentración de clorofila.

El cociente azul/verde (Figura 20), en cambio, si muestra este comportamiento, aumentando su valor conforme aumenta la concentración de clorofila. Ambas variables muestran correlación alta 0.78, lo que concuerda con lo obtenido con el índice de Carlson y las firmas espectrales (Schalles, 2006). El cociente de bandas infrarroja/roja no arroja resultados claros ya que los valores se comportan de manera errática. Teóricamente, la fotosíntesis tiene un componente importante de absorción alrededor de los 680nm (Gower *et. al.*, 1999), pero al mismo tiempo, la atenuación por efecto del agua pura es mucho mayor en estas regiones que en las longitudes de onda más corta (Morel, 1977).

Además, los fotones rojos libres pueden ser rápidamente reabsorbidos, tanto intracelularmente, como por otras células en concentraciones elevadas (Suggett *et al.*, 2011; Topliss, 1986). Es posible que todos estos efectos alteren el comportamiento de los datos significativamente, evitando que se aprecie una relación lineal similar a la del coeficiente azul/verde (Gitelson *et. al.*, 2007). Aunque no es posible medir cuantitativamente del efecto de la absorción y emisión de fotones rojos en las imágenes de satélite, es posible detectarlo empíricamente con las firmas espectrales:

La fluorescencia pasiva se define como la energía re-emitida por parte de una molécula de clorofila (u otros pigmentos) cuya fuente primaria de excitación es la luz del sol. Se

ha demostrado que la emisión de fluorescencia en los pigmentos a los 685nm puede ser detectada a través de la columna de agua dentro de la irradiancia emergente en el océano (Gower, 1981). La cantidad de energía re-emitida se utiliza como indicador de la eficiencia fotosintética (Topliss, 1986). En las lecturas tomadas en las diferentes estaciones, se logra apreciar un recorrido del pico hacia los 700 nm en zonas de alta turbidez o concentración de clorofila, provocado por la dispersión que provocan las propias partículas de fitoplancton suspendidas en el agua. Esto hace que exista un índice de absorción diferencial hacia las longitudes de onda por debajo de los 700nm, por otro lado las longitudes por encima de los 700nm se absorben en altas cantidades por el agua pura (Gower *et al.*, 1999). Este efecto es notorio en los sitios de mayor amplitud de la señal Ch1, LaE y Ba2, que también presentan mayores concentraciones de materia orgánica fotosintética. En sitios con menor concentración el pico regresa a su posición teórica en los 685nm (Suggett *et al.*, 2011).

Los datos no muestran correlación entre la cantidad de clorofila y las variables físicas del medio: cantidad de oxígeno disuelto ($r = 0.5$), conductancia ($r=0.56$). Teóricamente, los sitios eutrofizados presentan disminuciones en la concentración de oxígeno disuelto conforme aumenta la profundidad, así como un aumento en la conductancia por la mayor presencia de iones libres (Vollenweider, 1971), en este caso es posible que la circulación natural de las lagunas aún sea suficiente para compensar este efecto, o que hayan hecho falta mediciones a mayor profundidad.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Se logró determinar el estado trófico de la laguna conjuntando métodos de campo y de percepción remota dentro del parque nacional “Lagunas de Montebello” existen zonas con elevadas concentraciones de clorofila.

Las firmas espectrales de campo pudieron detectar los picos de absorción y reflectancia en la región de los 600-800nm, que son característicos de la clorofila “a”. A partir de estos picos se infiere un posible estado de eutrofización en la mayoría de los sitios de la laguna, en particular los sitios Ch1, LaE y Ba2, dado que las señales muestran picos con un recorrido importante hacia los 700 nm.

Esto concuerda con lo arrojado por el cociente azul/verde de la imagen del satélite y por las medidas del fluorómetro. Existen estaciones con mayor concentración de clorofila y aunque no es tan claro el desfase, el pico en los 685 nm es conspicuo.

Los datos de campo corroboran que los indicadores más fiables para detectar clorofila mediante imágenes de satélite son los cocientes y algoritmos basados en los valores digitales en bandas alta penetración (azul/verde). Conforme estos sean mayores, se espera que exista una mayor concentración de clorofila. Los cocientes basados en bandas de mayor longitud de onda son, en teoría, adecuados. Sin embargo la susceptibilidad de los fotones rojos a ser absorbidos rápidamente altera los resultados de las mediciones.

Se recomienda usar estos cocientes con precaución y de ser posible recurrir, si se cuenta con el presupuesto a imágenes de alta resolución espectral, que la fecha de la imagen se acerque lo más que se pueda a la fecha del muestreo o de ser posible a el

día de muestra, que la toma de muestras sea a la misma hora, si se tiene el personal para ello y que de ser posible que el muestreo tenga mayor densidad de puntos para su correcta comparación.

PERSPECTIVAS

Este trabajo indica que existen razones para pensar que, al igual que en muchos de los ecosistemas lacustres mexicanos, las lagunas de Montebello se encuentran bajo condiciones inestables y de deterioro ambiental moderado y con tendencia a grave.

La no linealidad del proceso de eutrofización no permite conocer mediante los métodos aquí utilizados el umbral de tolerancia del sistema a los aportes terrígenos. Aun así, conjuntando las expectativas teóricas con los datos obtenidos todo indica que las lagunas están muy cerca de superar ese umbral.

Estudios longitudinales basados en el monitoreo constante son siempre recomendables para este tipo de sistemas, ya que la reciente variabilidad en las condiciones climáticas y su efecto sobre la estacionalidad pueden ser críticos para un sistema en estas condiciones.

Es recomendable utilizar éste procedimiento para el diseño de muestreo en campo, teniendo datos preliminares de lo esperado, es posible la detección de focalizar puntos donde sea necesario un muestreo intenso y puntos donde deba ser moderado para optimizar tiempo, capital humano y económico en cualquier tipo de proyecto, así mismo para un monitoreo estacional reuniendo información anual del área así como la inclusión de otras variables como fósforo, permitiendo realizar las series pertinentes para la toma de decisiones.

REFERENCIAS

- Aguirre Gómez, R. (2001). *Caracterización óptica de la laguna costera de Coyuca de Benítez*. Investigaciones geográficas(46), 78-97.
- Aguirre Gómez, R. (2011). *Los mares mexicanos a través de la percepción remota III.1*. México. Instituto de Geografía, UNAM. PP. 15,18, 19.
- Aguirre-Gómez, R. (2013). *Hyperspectral analysis of Zumpango Lake, México*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611. Versión final aceptada el 24 de julio 2013.
- Aronoff, S. (2005). *Remote sensing basics: ESRI Press, Redlands, CA-USA*.
- Butler, M.J.A., Mouchot, M.c.; Barale, V.; LeBlanc, C. (1990). *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio*. Roma 212p. FAO.
- Campbell J. (2007) *Introduction to remote sensing*. The guilford press, New York, London. Pp. 3, 4, 11, 107
- Camps-Valls G. (2011) *Remote Sensing Image Processing*. Texas University Ed. Morgan & Claypool ISBN: 9781608458202
- Castellanos E., N. G. d. M., Álvarez de Mejía M., López M. B., España, . (2002). *Lago Atitlán: proyecto volcanes de Atitlán*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Carlson R. E. (1977). *A trophic state index for lakes*. Limnological Research Center, University of Minnesota, Minneapolis 55455. Limnology and Oceanography. Pp. 361-368.
- Chávez, J. L. (2012). *Tratamiento Digital de Imágenes Multiespectrales* (2nd ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Collins G. B., Arar E. (1997). *In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence*. Method 445.0. National Exposure Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio 45268. Pp 445.0-1 / 445.0-22.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2009). *Estudio para el monitoreo de calidad del agua de las lagunas en el Parque Nacional Lagunas de Montebello*. México D.F. Pp. 12-14, 22-25.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2011). *Estudio para monitorear los parámetros de calidad de agua de las lagunas comunicadas con el sistema lagunar Tepancoapan*. México D.F. Pp 5-20.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2003) *Ficha informativa de los humedales de Ramsar (FIR)*. México D.F. Pp. 4-7
- Conger, C. L., Hochberg, E. J., Fletcher III, C. H., & Atkinson, M. J. (2006). *Decorrelating remote sensing color bands from bathymetry in optically shallow waters*. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, 44(6), 1655-1660.
- Contreras, E.F., (1994). *Manual de técnicas Hidrobiológicas*. Ed. Trillas. 149 p.

- Dall'Olmo, G., & Gitelson, A. A. (2006). *Effect of bio-optical parameter variability and uncertainties in reflectance measurements on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: modeling results*. *Applied optics*, 45(15), 3577-3592.
- Desortová, B. (1981). *Relationship between Chlorophyll-a Concentration and Phytoplankton Biomass in Several Reservoirs in Czechoslovakia*. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 66(2), 153-169.
- Desortová, B., Prange, A., & Puncochar, P. (1996). *Chlorophyll-a concentrations along the River Elbe*. *Large Rivers*, 203-210.
- De la Lanza E. G., Hernández P.S., Carbajal J. (2000). *Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación*. (Bioindicadores). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F. Pp 30-32
- Dickey, T., Lewis, M., & Chang, G. (2006). *Optical oceanography: recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations*. *Reviews of Geophysics*, 44(1).
- DOF. (2009). *Diario Oficial de la Federación*. Viernes 18 de diciembre de 2009. México, D.F. Segunda a cuarta sección.
- Ebro-URS. (2005). *Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la directiva del marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para fitoplancton*. Ministerio de Medio Ambiente. España. Pp 25-28
- Estruch, F. (2010). *Análisis de la clorofila en el agua a partir de una imagen multiespectral Quickbird en la zona costera de Gandía*. Universidad Politecnica de Valencia. España. Pp 10-12, 48-53.
- FAO (1997). *Xunta de Galicia and intergovernmental oceanographic commission of UNESCO*. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos
- Feng-Yang, M. Feng-Yang, Y. (1999). *Eutrophic Status Assessment Using Remote Sensing Data*. *EUROPTO Conference on Remote Sensing for Earth Science Applications*. Florence, Italy.
- Gitelson, A. A., Schalles, J. F., & Hladik, C. M. (2007). *Remote chlorophyll- a retrieval in turbid, productive estuaries*. Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, 109(4), 464-472.
- Gitelson, A, Gurlin D., Moses W. and Barrow T. (2009). *A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters*. *Environmental Research Letters* 4. 045003. Pp 1-5
- Gómez, R. A. (2014). *Análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos in situ*. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. UNAM.
- Gower, J., & Borstad, G. (1981). *Use of the in vivo fluorescence line at 685 nm for remote sensing surveys of surface chlorophyll a* *Oceanography from space* (pp. 329-338): Springer.
- Gower, J., Doerffer, R., & Borstad, G. (1999). *Interpretation of the 685nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS*. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9), 1771-1786.

- Green, E. P., Mumby, P. J., Edwards, A. J., & Clark, C. D. (2005). *Remote sensing handbook for tropical coastal management*.
- Hardy, J., Hoge, F., Yungel, J., & Dodge, R. E. (1992). " *Remote Detection of Coral Bleaching Using Pulsed-Laser Fluorescence Spectroscopy*. *Marine Ecology Progress Series*, 88, 247.
- Hernandez, B. (2012). *Monitoreo satelital del Lago Atitlán en Guatemala. Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC)*, Ciudad del Saber, Panamá
- Hochberg, E. J. (2011). *Remote sensing of coral reef processes Coral Reefs: An Ecosystem in Transition* (pp. 25-35): Springer.
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press.
- Lyzenga, D. R. (1978). *Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features*. *Applied optics*, 17(3), 379-383.
- Matishov, G., Povazhnyi, V., Berdnikov, S., Moses, W., & Gitelson, A. (2010). *Satellite estimation of chlorophyll-a concentration and phytoplankton primary production in the Sea of Azov*. Paper presented at the Doklady Biological Sciences.
- Mazel, C. (1995). *Spectral measurements of fluorescence emission in Caribbean cnidarians*. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 120(1), 185-191.
- Mazel, C. H. (1997). *Coral fluorescence characteristics: excitation/emmission spectra, fluorescence efficiencies, and contribution to apparent reflectance*. Paper presented at the Ocean optics XIII.
- Mobley, C. D. (1999). *Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements*. *Applied optics*, 38(36), 7442-7455.
- Morel, A., & Prieur, L. (1977). *Analysis of variations in ocean color*. *Limnol. Oceanogr.*, 22(4), 709-722.
- Ortiz R. A. (2006) *Estudio de los sistemas acuáticos (lenticos) del estado de Morelos*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. 129, 138.
- Preisendorfer, R. W. (1986). *Secchi disk science: Visual optics of natural waters*. *Limnol. Oceanogr.*, 31(5), 909-926.
- Rees, G., & Rees, W. G. (2012). *Physical principles of remote sensing*. Cambridge University Press.
- Rees, W. (2001). *Improving the accuracy of low-cost GPS measurements for remote sensing applications*. *International Journal of Remote Sensing*, 22(5), 871-881.
- Sacristán Romero, F. (2006). *Teledetección satelital en la visión territorial y sistemas de protección ambiental urbano* (1a parte). *Urbano*, 9(14).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2007). *Programa de conservación y manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello*. CONANP. México D.F. Pp 19-28

- Schalles, J. F. (2006). *Optical Remote Sensing Techniques to Estimate Phytoplankton Chlorophyll a Concentrations in Coastal Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes* (pp. 27-79): Springer.
- Schowengerdt, R. A. (2006). *Remote sensing: models and methods for image processing*. Academic Press. British Library ISBN 13: 978012 Printed in United States of America. Elsevier. Pp 388-394
- Suggett, D. J., Prášil, O., & Borowitzka, M. A. (2011). *Chlorophyll a Fluorescence in Aquatic Sciences*. Springer.
- Swain, P. H., & Davis, S. M. (1978). *Remote sensing. The Quantitative Approach*, New York.
- Tester, P. A., & Stumpf, R. P. (1998). *Phytoplankton blooms and remote sensing: What is the potential for early warning?* Journal of Shellfish Research, 17(5), 1469-1471.
- Topliss, B., & Platt, T. (1986). *Passive fluorescence and photosynthesis in the ocean: implications for remote sensing*. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 33(7), 849-864.
- Vollenweider, R. A. (1971). *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*. Organisation for economic co-operation and development Paris.
- Yacobi, Y. Z., Moses, W. J., Kaganovsky, S., Sulimani, B., Leavitt, B. C., & Gitelson, A. A. (2010). *Chlorophyll a in turbid productive waters: testing the limits of NIR-Red algorithms*. Paper presented at the Proc. 'ESA Living Planet Symposium', Bergen, Norway.
- Yang, M.-D., & Yang, Y.-F. (1999). *Eutrophic status assessment using remote sensing data*. Paper presented at the Remote Sensing.
- Yang, M. D., Merry, C. J., & Sykes, R. M. (1999). *Integration of water quality modeling, remote sensing and GIS*. Wiley Online Library.
- Zimba, V. P.; & Gitelson, A. (2006). *Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization*. Aquaculture 256, 272-286pp

Biospherical Instruments Inc. ® consulta: 31 de octubre 2013. 16:40pm

URL:<http://www.comm-tec.com/Prods/mfgs/Biospherical/Brochures/pnf-300.pdf>

Turnerdesigns consulta vía web 13/01/2015 13:21pm

URL:<http://www.turnerdesigns.com/products/field-fluorometer/10au-field-fluorometer>

Satellite Imaging Corporatio consulta: 31 de octubre 2013. 15:00pm

URL:<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/spot-6.html>

Satellite Imaging Corporation consulta: 31 de octubre 2013. 14:30pm

URL:<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/geoeye-1.html>

OceanOptics® consulta: 31 de octubre 2013. 16:00pm

URL:<http://www.oceanoptics.com/products/usb2000+rad.asp>