

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
UNIDAD ACADÉMICA DE AGRICULTURA



**VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL ALGORITMO OC2 PARA
LANDSAT 8 APLICADO AL LAGO CRÁTER DE SANTA MARÍA DEL
ORO, NAYARIT.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGA

P R E S E N T A:

LIZETTE ZAREH CORTES MACÍAS

(Xalisco Nayarit, Junio 2018)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
UNIDAD ACADÉMICA DE AGRICULTURA

M. C. VÍCTOR MANUEL JIMENEZ MEZA
DIRECTOR DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE AGRICULTURA
P R E S E N T E

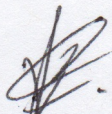
En el municipio de Xalisco Nayarit, siendo las 11:00 a.m. del día **29 de Junio del año 2018**, en las instalaciones de la Unidad Académica de Agricultura se reunieron los miembros del Cuerpo Tutorial en la tesis titulada: "*Validación y Calibración del Algoritmo OC2 para Landsat 8 aplicado al Lago Cráter De Santa María Del Oro, Nayarit*", que presenta la C. **Lizette Zareh Cortes Macías** para la obtención del título de LICENCIADA EN BIOLOGÍA.

Después del análisis del documento presentado, los miembros de la comisión manifiestan su

APROBACIÓN DE LA TESIS

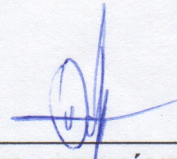
En virtud de que satisface los requisitos establecidos en el reglamento de titulación de ésta Unidad Académica.

Los miembros del Cuerpo Tutorial



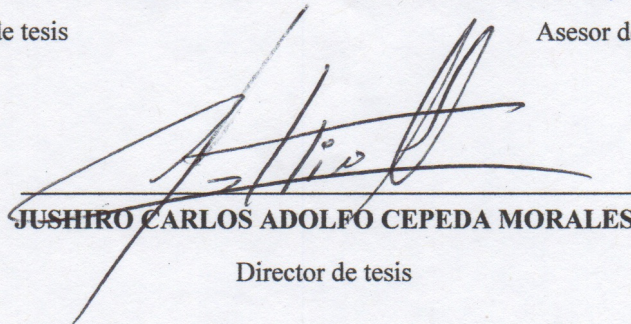
JUAN PABLO RIVERA CAICEDO

Asesor de tesis



OSCAR UBISHA HERNÁNDEZ ALMEIDA

Asesor de tesis



JUSHIRO CARLOS ADOLFO CEPEDA MORALES

Director de tesis



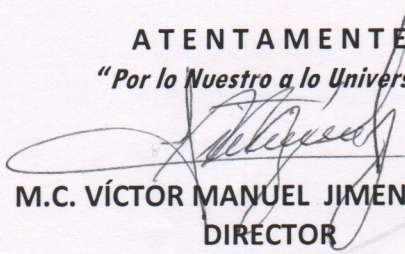
Oficio No. DIR/UAA/UAN/158/18
Xalisco, Nayarit; 30 de Agosto del 2018

C. ING. JOSE ERNESTO VILLANUEVA TREJO
DIRECTOR DE ADMINISTRACION ESCOLAR DE LA UAN.
P R E S E N T E.

En relación al oficio sin número y con fecha 29 de junio del 2018, remitido por los CC. Dr. Jushiro Carlos Adolfo Cepeda Morales, Dr. Juan Pablo Rivera Caicedo y Dr. Oscar Ubisha Hernández Almeida, como Director y Asesores respectivamente de la **C. LIZETTE ZAREH CORTES MACIAS**, pasante de la carrera de Biología (Generación 2012 - 2018) en el cual se nos menciona que después de haber revisado su Trabajo de Tesis Profesional, reúne las condiciones necesarias para ser impresa.

Esta dirección a mi cargo, autoriza la impresión de la misma para que pueda realizar los trámites correspondientes ante esa Administración, y fijar la fecha de Examen Profesional.

ATENTAMENTE
"Por lo Nuestro a lo Universal"


M.C. VÍCTOR MANUEL JIMENEZ MEZA
DIRECTOR



C.c.p.- Archivo.



*“Si las puertas de la percepción quedaran depuradas,
todo se habría de mostrar al hombre tal cual es: infinito.*

*(...)Pero el hombre se ha recluso hasta no ver las cosas
sino a través de las aberturas de su caverna.”*

William Blake

A mis abuelos:

María Castro y Apolinar Cortes.

Alejandra Aguilar y Gregorio Macías,

Admiro el trayecto largo y emocionante, pero duro, que han recorrido durante su vida,
y celebro las decisiones que los trajeron a converger en esta ciudad.

Gracias por inculcarme el no tener miedo al trabajo,
por germinar y crecer en mí la idea de que la educación cambia vidas.

Ustedes me enseñaron que el conocimiento nos hace libres.

Me enorgullecen siempre.

A mis padres, porque siempre pienso en ustedes.

Agradecimientos

- A mi mamá: Maricela Macías Aguilar, y a mi papá: Fernando Cortes Castro. Por qué – literalmente- la culminación de esta etapa de mi vida, es obra y recompensa de su esfuerzo y trabajo. Gracias por no ser unos padres ordinarios. Por darnos –a mis hermanos y a mí- la libertad y la responsabilidad de ser quiénes somos, por respaldarnos en nuestras decisiones –aunque muchas veces estuvieran en desacuerdo con ellas-. Gracias por tanto amor.
- Dr. Jushiro Cepeda y Dr. Juan Pablo Rivera Caicedo, gracias por darme el impulso y las herramientas para alcanzar mis objetivos. Por recordarme que soy capaz cuando de pronto lo olvido. Gracias por crear un ambiente tan ameno en el laboratorio, y hacer(nos) sentir a sus alumnos como en casa. Por todo su interés en nuestro desarrollo académico y por todos sus consejos. Gracias por presentarme este proyecto tan bonito, por compartir con nosotros todo lo que saben (¡Y es tanto!). La vida me debía algo, y luego los puso a ustedes en mi camino: gracias por recordar lo que es ser Humano (en todas las dimensiones del calificativo).
- Al equipo de PERSEO: gracias Enrique por las pláticas, debates y discusiones de todos los días, por las mañanas de café, por tu disposición a apoyarnos siempre en tantas cosas. Gracias a Tere por guiarme en los temas de sistemas de información geográfica, por las charlas, las risas y los consejos. A Nayomi, por su ayuda en el procedimiento de extracción y medición de clorofila. A Daisy y Geraldine, por compartir su experiencia conmigo. Por todas las vivencias que hemos compartido en PERSEO. Gracias porque aquí he aprendido a asimilar (y desarrollarme) como parte de un equipo, ¡y qué equipazo!
- Gracias al Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología, por el espacio. Gracias a sus trabajadores que nos han recibido y apoyado.

- Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente por la beca que me permitió realizar este proyecto.
- A la Universidad Autónoma de Nayarit, porqué la Universidad transformó mi mundo en muchas formas.
- A Mercedes Zambrano del laboratorio de Contaminación Química, gracias por ser tan amable siempre. Por toda tu ayuda, paciencia y consejos durante el procesamiento de la clorofila. También gracias por dejarme guardar mi comida en tu refrigerador jaja, y por contagiarme tu sonrisa cada vez que te veo.
- Al Cuerpo Académico de Ecología de sistemas Acuáticos (CA-UAN 301) por sus esfuerzos de muestreo e investigación en el Lago de Santa María del Oro; por permitirme participar en sus muestreos y utilizar los datos en este proyecto. Gracias al Dr. Ubisha Hernández Almeida y al Dr. Carlos Romero Bañuelos por su disposición a ayudarme a resolver dudas que surgieron durante el desarrollo del proyecto.
- Esta tesis representa para mí la culminación de un gran proceso (dentro de otro *graaan* proceso); hay personas que llegaron y otras que se fueron, algunas marcaron mi vida significativamente en diferentes formas. Quiero agradecer a mis maestras de biología: Ivette Sierra, María Hanan Alipi, Elsa Figueroa, Guadalupe Herrera Patrón y Rosa Esthela Gonzales, pues de cada una aprendí tanto. Por su basta sabiduría académica así como por su gran calidad como personas, han sido mi mejor ejemplo a seguir todo este tiempo.
- Al maestro Isaías León, de Filosofía. Gracias por su labor como docente, que va mucho más allá de dar una clase. Por ponernos (a los estudiantes) el ejemplo de lo que es ser una ‘persona culta’, por animarnos a cumplir nuestros sueños más guajiros (como publicar un cuento en un *plaqueette literario*). Gracias por escuchar, y por compartir.

- A Lizette H., a Ana Karen, a Ulises, a Mai, a Lucero y a Yohana. ¿Qué les digo? No sé qué sería de mí sin ustedes. Gracias por su amistad que me mantiene a flote cuando siento que la vida me rebasa. Gracias por ya tantos años que nuestras vidas se comparten; aunque no les vea seguido, si de algo estoy segura en esta vida es que mi barrio me respalda. Gracias por ser, y gracias por estar.
- Gracias a las biólogas Gisel, Yess y Fátima, por su gran valor de compañerismo durante la carrera. Ustedes tienen un lugar reservado en el cielo de la gente buena onda.
- A mis colegas y amigos, Javier Paniagua y Oscar (Suricato), por todo lo que compartimos en biología, las veces que casi me ahogo de la risa con nuestras tonterías, por todo lo que aprendimos juntos. Fueron los mejores compinches que pude tener en la carrera, los quiero.
- A Ramón Mora, por haber sido parte importante de mi período universitario, gracias por apostarle y sumar siempre a mi capacidad de crear.
- A Nayari Otis Castillo y a su familia por ser parte de este proceso, por todo el apoyo, por mostrarme otras formas de vivir, y convivir.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo General.....	4
1.1.2 Objetivos específicos	4
1.2 Hipótesis	4
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Óptica.....	5
2.2 Bio-óptica.....	7
2.2.1 Propiedades Ópticas Inherentes.....	7
2.2.2 Propiedades Ópticas Aparentes	8
2.3 Teledetección	10
2.3.1 Eutrofización, Color del Agua y Sensores Remotos	11
2.3.2 Serie LANDSAT	14
2.3.3 Calibración radiométrica y corrección atmosférica.....	18
2.4 Algoritmo (chlor_a OCx) OCEAN COLOR	19
2.4.1 Descripción del algoritmo	20
2.4.2 Algoritmos de determinación de clorofila para SeaWiFS	21
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1 Área de estudio	25
3.2 Diseño de muestreo.....	26
3.3 Tratamiento de muestras de clorofila.....	29
3.3.1 Extracción de clorofila.....	29
3.3.2 Cuantificación de Clorofila-a	29
3.3.3 Calibración del método.....	30

3.4	PROCESAMIENTO DE ESCENAS.....	32
3.4.1	Adquisición de repositorio de imágenes satelitales.....	32
3.4.2	Calibración radiométrica y corrección atmosférica.....	32
3.4.3	Extracción de datos de reflectividad.....	33
3.5	Validación del algoritmo	33
3.6	Calibración del algoritmo	33
	CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1	Análisis de la concentración de clorofila <i>in-situ</i> en SAMAO.....	36
4.2	Caracterización espectral	40
4.3	Validación del algoritmo OC2.....	42
4.4	Calibración del algoritmo	43
	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	55
	REVISIÓN DE LITERATURA.....	56

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Algoritmos desarrollados para determinar Cl-a con LANDSAT Thematic Mapper. .</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Algoritmos desarrollados para determinar Cl-a con LANDSAT Enhanced Thematic Mapper Plus.</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3. Algoritmos desarrollados para determinar Cl-a con Landsat Data Continuity Mission.</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4. Coeficientes específicos (a0-a4) propuestos por NASA Ocean Color para el sensor OLI, empleando el algoritmo OCx de dos bandas.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 5. Número y fecha de muestreo en SAMAO.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6. Número de ID y coordenadas UTM de las estaciones de muestreo en SAMAO.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 7. Resultados de los cálculos para la dilución de la solución madre en la curva de calibración para aguas continentales.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 8. Resultados de la lectura fluorométrica y conversión a ug/L.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 9. Nombre y fecha de adquisición de las escenas LANDSAT utilizadas para la validación y calibración del algoritmo.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 10. Resumen de los estadísticos de media, desviación estándar, mínimo y máximo de las reflectancias en las estaciones de muestreo para el mes de marzo, los unidades de medición de los valores fueron dados por el software ENVI.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 11. Resumen de los estadísticos de media, desviación estándar, mínimo y máximo de las reflectancias en las estaciones de muestreo para el mes de Agosto. Las unidades de medición de los valores fueron dados por el software ENVI.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 12. Coeficientes propuestos para determinar clorofila en SAMAO mediante el algoritmo OC2 aplicado a datos LDCM.....</i>	<i>42</i>

Lista de figuras

<i>Figura 1. Espectro electromagnético, se destaca la porción de radiación fotosintéticamente activa (400 a 700 nm).....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2 Firma espectral de la clorofila- a, en comparación con otros pigmentos fotosintéticos.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3. Estructura molecular de la clorofila-a (Ilustración del dominio público).</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4 Geometría utilizada para definir las IOP (Modificado de Mobley, 1994, citado en Tenjo, 2012).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5 Geometría utilizada para definir las propiedades ópticas aparentes, se observan las relaciones angulares de la irradiancia.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 6 Cronograma de Satélites Serie LANDSAT (NASA, 2017).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7 Ubicación del Lago-cráter de Santa María del oro en el Estado de Nayarit. Mapa realizado usando Natural Earth Data en Qgis.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 8 RGB Lago-cráter de Santa María del Oro mostrando ubicación espacial de las 13 estaciones de muestreo (mapa elaborado con el software ArcMap).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 9 Evaluación de la curva de calibración para aguas continentales: análisis de regresión, coeficiente de determinación y pendiente de la recta.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10. Esquema resumiendo la metodología realizada para la calibración de los nuevos coeficientes para el algoritmo OC2.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 11. Concentración de Cl-a ($\mu\text{g/L}$) medida durante el año 2015 en el Lago de Santa María del Oro.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 12. Temporalidad de la concentración de clorofila ($\mu\text{g/L}$) en SAMAO durante el año 2015 para la estación de muestreo No. 13.</i>	<i>37</i>

<i>Figura 13. Mapas de la distribución espacial estimada con técnicas de interpolación para el año 2015.</i>	38
<i>Figura 14. (Continuación) Mapas de la distribución espacial estimada con técnicas de interpolación espacial para el año de 2015.</i>	39
<i>Figura 15. Estadísticos espectrales de la reflectancia en las 13 estaciones de SAMAO y recorte de escena obtenida con el sensor OLI para el mes de marzo del 2015.</i>	40
<i>Figura 16. Estadísticos espectrales de la reflectancia en las 13 estaciones de SAMAO y recorte de escena obtenidas con el sensor OLI para el mes de agosto del 2015.</i>	41
<i>Figura 17. Análisis de regresión usado para determinar la correlación entre los valores estimados por el modelo OC2 y los valores obtenidos en campo.</i>	42
<i>Figura 18. a) diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la primera iteración.</i>	44
<i>Figura 19. . a) diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la segunda iteración.</i>	45
<i>Figura 20. a) Diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la tercera iteración.</i>	46
<i>Figura 21. a) Diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la cuarta iteración.</i>	47

Figura 22. a) Diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la quinta iteración.48

Figura 23. La distribución de los errores en la validación del algoritmo y en las iteraciones.49

Figura 24. Las gráficas muestran los resultados del R^2 y el RMSE en la validación y por cada iteración realizada durante el proceso de calibración..50

Figura 25. Gráfico circular del total de datos anómalos depurados.....51

Figura 26. Gráfico de dispersión comparando el desempeño del algoritmo OC2 antes y después del proceso de calibración. Cálculo y gráficos realizados con MATLAB.....52

Figura 27. Mapas de Cl-a empleando el algoritmo OC2 para los meses marzo y agosto.....53

VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL ALGORITMO OC2 PARA LANDSAT 8 APLICADO AL LAGO CRÁTER DE SANTA MARÍA DEL ORO, NAYARIT.

Lizette Zareh Cortes Macías. Licenciada en Biología.

Unidad Académica de Agricultura. 2018.

RESUMEN

Palabras clave: algoritmo, clorofila, fitoplancton, lagos, LANDSAT, teledetección.

Uno de los principales indicadores de la calidad en los cuerpos de agua continentales es la biomasa y la composición de especies del fitoplancton. Las actividades antrópicas suelen ocasionar el aumento en la concentración de nutrientes, propiciando así la existencia de florecimientos algales, muchos de éstos corresponden a cianobacterias, las cuales deterioran la calidad del agua ya que favorecen a la producción de compuestos como metano y sulfuro. La concentración de clorofila-a (Cl-a) se utiliza para estimar en forma indirecta el contenido de biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, debido a que es el principal pigmento fotosintético presente en las microalgas. En la actualidad es posible estimar desde sensores remotos la concentración de Cl-a en los cuerpos de agua continentales mediante la aplicación de algoritmos empíricos o analíticos. El objetivo de este estudio fue validar y calibrar el algoritmo OC2 propuesto por O'Reilly, (1998) y desarrollado por el Ocean Biology Processing Group (OBPG) para la estimación de la concentración de Cl-a, con medidas *in-situ* de la concentración de Cl-a superficial en el lago-cráter de Santa María del Oro, aplicados a datos obtenidos por el sensor OLI a bordo del satélite Landsat Data Continuity Mission. Los estadísticos para calcular la precisión del algoritmo y el desempeño de los coeficientes calibrados fueron el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio. Los resultados obtenidos en la validación del algoritmo indicaron una baja correlación entre la clorofila *in-situ* y la clorofila satelital con un error cuadrático medio de 6.44, y un coeficiente de determinación de 0.38. Debido a estos resultados se proponen nuevos coeficientes, obtenidos mediante un proceso de calibración, para la función polinomial de 4 órdenes. Éstos índices funcionaron satisfactoriamente para determinar Cl-a en lago-cráter de Santa María del Oro con un error cuadrático medio de 0.64 y un coeficiente de determinación de 0.94, lo que indica que un 94% de los valores están explicados por el modelo sugerido, por lo tanto la hipótesis planteada en este proyecto es correcta.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La clorofila-a (Cl-a) es un pigmento fotosensible que se presenta en todos los grupos de algas, por lo que su concentración es un importante indicador de la biomasa de fitoplancton en todos los ecosistemas acuáticos (Tenjo, 2015). Sin embargo, los métodos tradicionales de muestreo en campo que se usan para estimar concentraciones de Cl-a requieren una alta inversión económica y de tiempo, lo que dificulta hacer estudios globales o de regiones amplias (Brivio *et al.*, 2001; Duan *et al.*, 2007; H. Duan *et al.*, 2008; Guan *et al.*, 2011; Gilerson *et al.*, 2010; Nas *et al.*, 2010; Torbick *et al.* 2013; Dube *et al.*, 2015; Masocha *et al.*, 2017). Además, la frecuencia espacial y temporal de los programas de muestreo *in-situ* no son adecuados para reportar cambios en la biomasa del fitoplancton, especialmente durante los florecimientos algales, cuando la variación espacial y temporal en la densidad del fitoplancton es particularmente alta (Rantajärvi *et al.*, 1998). En este aspecto, las técnicas de teledetección ofrecen un método relativamente fácil y barato, capaz de cubrir áreas de estudio extensas o múltiples de forma simultánea. Esto se logra a partir de la aplicación de algoritmos que integran datos limnológicos colectados *in-situ* con mediciones de reflectividad obtenidas a través de satélites puestos en órbita. De forma que el desarrollo y validación de algoritmos para estimación de clorofila permite obtener información continua acerca de los cambios en la biomasa del fitoplancton y en particular, permite evaluar la extensión temporal y espacial de los florecimientos algales en regiones amplias (Duan *et al.*, 2008; Ritchie *et al.*, 1990 y Kutser *et al.*, 2006). Partiendo de este principio, se ha desarrollado una amplia gama de sensores ópticos con diferentes resoluciones espectrales, espaciales y temporales, desde el sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) a bordo del satélite Nimbus 7 puesto en órbita en 1978, hasta las novedosas misiones SENTINEL del programa COPERNICUS de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés).

El enriquecimiento de nutrientes en los cuerpos de agua tiene como consecuencia el incremento de la producción de materia orgánica por el fitoplancton. Éste se denomina eutrofización. Si bien la eutrofización de los cuerpos de agua continentales se entendía como un fenómeno natural inducido por procesos autóctonos (Rohlich, 1969), la eutrofización cultural inducida por actividades antropogénicas, es una condición que domina en las aguas superficiales de todos los continentes y se ha convertido en un problema ambiental global, el cual se pronostica se

intensificará en las siguientes décadas debido principalmente al aumento demográfico y el cambio de uso de suelos (Carpenter, 2005). La eutrofización de los cuerpos de agua favorece la aparición de florecimientos algales frecuentes, e incluso permanentes (Tomasini *et al.* 2016) de ciertas comunidades de fitoplancton, principalmente de las especies más aptas para crecer en estas condiciones especiales, como diatomeas, dinoflagelados y cianobacterias (De León, 2002). Las cianobacterias son consideradas como indicadores del deterioro ambiental de los lagos pues estos microorganismos afectan la calidad del agua al favorecer la producción de diferentes compuestos con azufre que dejan un sabor y olor desagradable en el agua (Pizzolon, 1996). Las cianobacterias son las principales responsables de los eventos de intoxicación en aguas dulces, y en unos pocos casos también en aguas marinas (Pizzolon, 1996). Esto representa una problemática global ya que a pesar que la Tierra está cubierta en un 70% de su superficie por agua, únicamente el 2,5% de este total es apta para el consumo humano, y a su vez, sólo el 0,3% de ésta es fácilmente accesible en forma de lagos, embalses y ríos (Kalff, 2001). En la actualidad se han detectado casos de eutrofización en lagos de todo el mundo, principalmente en Europa, en el norte y centro de América, África, Indonesia, India, Japón y Nueva Zelanda (Mendonado, 2013; Carpenter, 2005; Golterman y Oude, 1991). México tiene lagos destinados a actividades deportivas y/o recreativas que presentan alto grado de eutrofización debido principalmente al excesivo aporte de desechos residuales, junto con la falta de planificación y de manejo integrado de los recursos (Tomasini *et al.* 2016). Particularmente, la configuración topográfica de Nayarit se caracteriza por grandes sistemas montañosos donde se originan gran cantidad de cuerpos de agua que drenan en la extensa llanura costera y que favorecen la existencia de pantanos, planicies de inundación y lagunas costeras, así como cordones de dunas frontales que se entremezclan con los humedales en la zona de Marismas Nacionales (SEMARNAT-INECOL). La región que comprende mayores depósitos lacustres a lo largo de la entidad en la costa es una faja costera de 40 kilómetros a partir del mar que va a todo lo largo de la entidad. Las principales lagunas y esteros, de norte a sur, son: el estero Puerta, laguna La Garza, estero Cuautla y lagunas de El Pescadero, Agua Brava, El Valle y la de Mexcaltitán. En tanto que en la porción sur del estado se presentan las lagunas de Santa María del Oro (SAMAO), Tepeltitic y la de San Pedro (INEGI, 1990). El lago Santa María del Oro, ubicado en el municipio del mismo nombre, es de origen volcánico y tiene gran importancia turística para la región, aun presentando florecimientos algales temporales de cianobacterias (Hernández, 2016). En conjunto con los

lagos Tepetitlic y San Pedro, SAMAO es considerado dentro de las regiones hidrológicas prioritarias del país (CONABIO, 2017) por ser una zona de sobre extracción de agua, y por la falta de estudios limnológicos y de la biodiversidad. El turismo que lo visita día con día, así como las actividades agropecuarias y forestales que se realizan a sus alrededores, le representan una fuerte presión ecológica (Serrano *et al.*, 2002).

De acuerdo a lo anterior, es importante monitorear, evaluar y detectar los florecimientos algales en aguas continentales durante períodos de tiempo pertinentes debido a la relevancia ambiental, económica y social que tienen estos fenómenos. Sin embargo, es difícil evaluar el alcance cualitativo y cuantitativo de los florecimientos algales a escalas amplias debido a que se dificulta acceder a datos de campo confiables por las características físicas de los cuerpos de agua, así como por el costo y tiempo tan elevado que implica realizar los muestreos y el procesamiento de las muestras en laboratorio; sin mencionar la temporalidad y el hecho de que éstos florecimientos son muy impredecibles y esto dificulta realizar un diseño de muestreo que permita caracterizar el proceso de generación de estos eventos. Así, la evaluación del estado de los cuerpos de agua con respecto a los florecimientos algales a través de la aplicación de algoritmos para determinación de Cl-a desarrollados específicamente para el área de estudio puede ser utilizada para establecer programas de monitoreo de alta resolución en tiempo y espacio. Para la realización de este trabajo se utilizaron datos del sensor OLI (Operational Land Imager) a bordo del satélite Landsat Data Continuity Mission (LDCM), el cual fue puesto en órbita en 2013 para continuar con la serie histórica de datos Landsat que comenzó en 1972 con el lanzamiento de Landsat 1. LDCM lleva consigo dos sensores: OLI con 9 bandas espectrales y TIRS (Thermal InfraRed Sensor) que cuenta con dos bandas térmicas. Aunque estos sensores no están espectralmente diseñados para la observación de cuerpos de agua, sus características radiométricas (12 bits), su alta resolución espacial (15-30 m/pixel) y su período de revisita de 16 días abren nuevas posibilidades en los estudios de las propiedades ópticas de aguas continentales, con el fin de determinar parámetros como concentración y distribución de Cl-a, temperatura, entre otras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Validar el algoritmo OC2 propuesto por O'Reilly *et al.* (1998), para el sensor OLI a bordo de la misión LDCM para el lago-cráter de Santa María del Oro.

1.1.2 Objetivos específicos

- Cuantificar mensualmente la concentración de clorofila superficial en el lago SAMAO.
- Desarrollar una base de datos con las medidas *in-situ* de concentración de Cl-a y medidas espectrales del sensor OLI.
- Estimar los parámetros de ajuste de la función polinómica de 4° orden, propuesta por O'Reilly, (1998), para las condiciones de SAMAO.

1.2 Hipótesis

La capacidad espectral y resolución espacial del sensor OLI son adecuadas para calcular la concentración de clorofila en el lago-cráter de Santa María del Oro empleando el algoritmo OC2.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Óptica

El espectro electromagnético (EM) hace referencia a diferentes tipos de radiación, la cual es energía que viaja en forma de ondas (Figura 1). Cada onda electromagnética tiene una longitud particular, donde la radiación con longitudes de onda larga contiene menos energía que aquella con longitudes de onda corta. El intervalo del espectro electromagnético entre los 400 a 700 nm constituye la luz fotosintéticamente activa (PAR, acrónimo del inglés Photosynthetically Available Radiation), dichas longitudes de onda son utilizadas por el fitoplancton quien absorbe fotones para la fotosíntesis (Bahamón, 2004). Este intervalo también es la única parte del espectro electromagnético que puede ser detectada por el ojo humano. Los fotones de la luz solar actúan como ondas, sin embargo, también pueden actuar como partículas (OpenStax College, 2013).

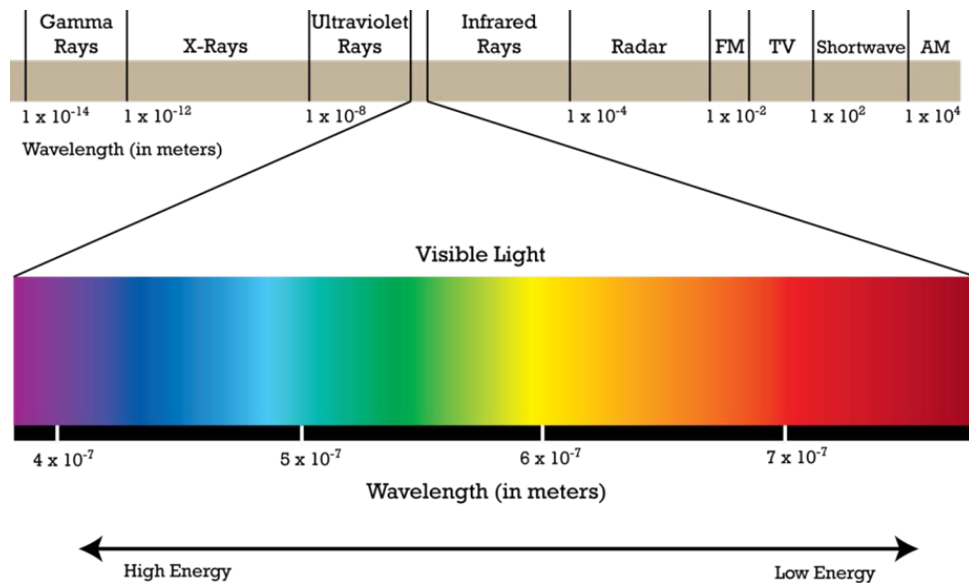


Figura 1. Espectro electromagnético, se destaca la porción de radiación fotosintéticamente activa (400 a 700 nm) (Ilustración por Rice University ©1999-2018, obtenida desde <https://cnx.org/>)Clorofila-a.

Hay cinco tipos de clorofilas caracterizadas estructuralmente: a, b, c, d y f (Aris *et al.*, 2014;). Éstas exhiben diferentes máximos de absorción debido a modificaciones relativamente menores

de su estructura química (Chen *et al.*, 2012). En las plantas, incluidas todas las algas, la Cl-a y Cl-b son los principales pigmentos fotosintéticos, la Cl-a constituye de manera aproximada el 75% de toda la clorofila de las algas verdes. Como lo muestra la figura 2, ésta absorbe radiación sobre todo en la parte del rojo (~650-700 nm), violeta (~400 nm) y azul (~450-490 nm) y refleja en el verde (~490-530 nm) (Manrique, 2003). A la forma en que un material refleja, emite o absorbe energía se le conoce como firma espectral (Karszenbaum y Barraza, 2018). De modo que la firma espectral permite identificar y discriminar diferentes objetos a partir de la señal registrada por un sensor en las diferentes regiones del EM (Karszenbaum y Barraza, 2018).

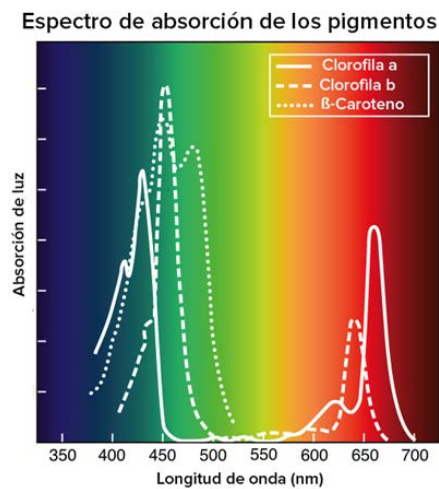


Figura 2 Firma espectral de la clorofila- a, en comparación con otros pigmentos fotosintéticos (Ilustración por Rice University, © 1999-2018, obtenida desde <https://cnx.org/>).

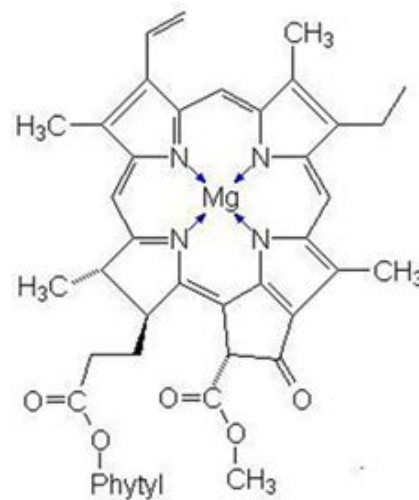


Figura 3. Estructura molecular de la clorofila-a (Ilustración del dominio público).

La figura 3 muestra la estructura molecular de la Cl-a, ésta molécula es de tipo porfirínico y tiene gran tamaño, está formada en su mayoría por carbono e hidrógeno y constituye un anillo tetrapirrólico ocupado en el centro por un único átomo de magnesio, rodeado por cuatro átomos de nitrógeno. A partir de este anillo parte una larga cadena de 20 átomos de carbono, denominada fitol que constituye el punto de anclaje de la molécula de Cl-a a la membrana interna del cloroplasto, el orgánulo celular donde tiene lugar la fotosíntesis (Evert, 2006).

Cuando la molécula de Cl-a absorbe un fotón, sus electrones se excitan elevándose a un nivel de energía superior (Manrique, 2003). Durante la fotosíntesis, el proceso de transporte de

electrones genera adenosín trifosfato (ATP) y nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH), nucleótidos necesarios para fijar carbono durante el ciclo de Calvin (Raisman y González, 2000).

2.2 Bio-óptica

La bio-óptica es la rama de la física que estudia la relación entre la luz y los componentes del agua, su fin es entender los factores que contribuyen a regular la transferencia de la luz dentro del agua, estos factores están relacionados con procesos biogeoquímicos, y principalmente con la productividad primaria fitoplanctónica y el ciclo global del carbono y nitrógeno (Ramus, 1995).

El agua natural es una mezcla de materia disuelta y partículas en suspensión, estos solutos y partículas son ópticamente significativos y muy variables en tipo y concentración. Debido a esto, las propiedades ópticas del agua muestran grandes variaciones temporales y espaciales y rara vez se asemejan a las del agua pura. Las propiedades ópticas del agua se dividen en dos clases mutuamente excluyentes: inherentes y aparentes (Mobley, 1994; Tenjo, 2012; Jiang, 2014).

2.2.1 Propiedades Ópticas Inherentes

Conocidas como IOP por sus siglas en inglés (Inherent Optical Properties), son aquellas propiedades que dependen de los constituyentes del agua y por lo tanto son independientes del campo de luz ambiental dentro del medio. Las propiedades ópticas inherentes se caracterizan como un campo de luz que se propaga a través de un punto dado en el medio el cuya trayectoria es modificada por los procesos físicos de absorción y dispersión debida a la interacción con las sustancias contenidas en el medio (Smith y Baker, 1981).

Las IOP fundamentales son el coeficiente de absorción y la función de volumen de dispersión, incluye también el índice de refracción, el coeficiente de atenuación del haz y el albedo de dispersión simple (Bahamón, 2004; Mobley, 1994).

$$\Phi_i(\lambda) = \Phi_a(\lambda) + \Phi_s(\lambda) + \Phi_t(\lambda)$$

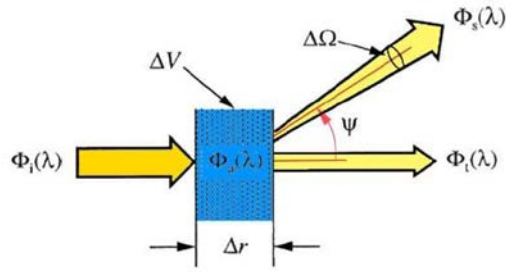


Figura 4 Geometría utilizada para definir las IOP (Modificado de Mobley, 1994, citado en Tenjo, 2012). Considerando un volumen ' ΔV ' de agua, cuyo espesor ' Δr ', es iluminado por un haz estrecho colimado de luz monocromática de potencia radiante espectral ' $\Phi_i(\lambda)$ ', ($W \llbracket nm \rrbracket^{-1}$). Una parte ' $\Phi_a(\lambda)$ ' de la potencia incidente ' $\Phi_i(\lambda)$ ' es absorbida dentro del volumen de agua. Otra parte ' $\Phi_s(\psi; \lambda)$ ' se dispersa fuera del haz en un ángulo ' ψ ', y la energía restante ' $\Phi_t(\lambda)$ ' se transmite a través del volumen sin cambiar la dirección. ' $\Phi_s(\lambda)$ ' es la potencia total que es dispersada en todas las direcciones. Para esto se supone que no se produce dispersión inelástica, es decir, se asume que los fotones no experimentan un cambio en la longitud de onda durante el proceso de dispersión (Mobley, 1994; Tenjo, 2012).

2.2.2 Propiedades Ópticas Aparentes

Las propiedades ópticas aparentes, llamadas AOP por sus siglas en inglés (Apparent Optical Properties), son muy complejas cuando se trata de estudiar lagos mediante sensores remotos (Jiang, 2014). Estas se basan no en las propiedades del cuerpo de agua, sino en la forma en que la luz solar penetra en el agua y cómo la señal de la superficie del agua llega al sensor (Kirk, 1984; Jiang, 2014). A diferencia de las IOP, las AOP no pueden medirse en muestras de agua, ya que dependen de la distribución de la radiancia en el ambiente que se encuentra, sin embargo, las AOP pueden relacionarse con las IOP por medio de la teoría de transferencia radiativa (Smith y Baker, 1981). Las AOP son de particular importancia cuando se considera la penetración de energía radiante en profundidades del cuerpo de agua, de uso general son la reflectividad de irradiación y los coeficientes de atenuación difusa. De este modo el coeficiente de atenuación difusa espectral para la irradiancia espectral descendente $K(\lambda)$ es la AOP que proporciona la medida más directa de la penetración de la energía radiante en el agua.

$$K_d(\mathbf{z}; \lambda) = - \frac{1}{E_d(\mathbf{z}; \lambda)} \frac{dE_d(\mathbf{z}; \lambda)}{dz} \quad (m^{-1})$$

Dónde $K_d(z; \lambda)$ es coeficiente de atenuación difusa espectral para la irradiancia espectral descendente, z es la profundidad del agua y λ la longitud de onda.

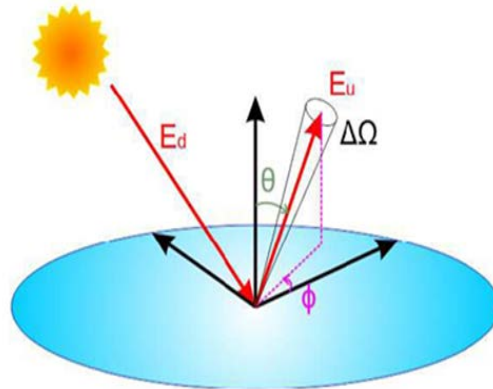


Figura 5 Geometría utilizada para definir las propiedades ópticas aparentes, se observan las relaciones angulares de la irradiancia, donde E_d es la irradiancia escalar descendente, E_u es la irradiancia escalar ascendente y θ , ϕ la dirección de retorno de la luz desde la superficie. (Mobley, 1994; citado en Tenjo, 2012). Irradiancia (E): Flujo de energía que se propaga por unidad de área, sin importar de dónde proviene (desde todas las direcciones). Sus unidades de medición son $[\text{Wm}^{-2}]$ $[\mu\text{m}]^{-1}$. Radiancia (L): Es el flujo radiante (ϕ) que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular. Se mide en las unidades $\text{Wm}^{-2} [\text{sr}]^{-1}$. Reflexión: Es el proceso mediante el cual el flujo electromagnético (potencia) que incide en un medio (o superficie) fijo deja ese medio desde el lado de incidencia sin tener cambios en su frecuencia. Reflectancia (R): Es la fracción del flujo incidente que es reflejado.

2.3 Teledetección

La teledetección es la ciencia de adquirir información acerca de la superficie de la Tierra sin entrar en contacto con ella directamente. Esto es posible detectando y guardando cantidades de energía reflejada o emitida y, procesando, analizando y aplicando esta información (Canada Centre for Mapping and Earth Observation, 2016). Las técnicas de teledetección han permitido ampliar la capacidad de las personas de entender los procesos naturales de la Tierra y actualmente están ganando más y más relevancia en las tareas de recopilación de información global, estas bases de datos espectrales están aumentando diariamente, cada vez con más escenas de numerosos sensores con diferentes resoluciones espectrales y espaciales (Zhang *et al.*, 2016).

En la actualidad existen diversas clasificaciones para los sensores, pero básicamente podemos dividirlos en pasivos y activos; los sensores pasivos son aquellos que miden la radiación electromagnética que está disponible naturalmente, o sea que estos solo pueden ser usados mientras el Sol ilumina la Tierra, por otro lado, los sensores activos están provistos con su propia fuente de energía, en estos el sensor emite radiación que es dirigida directamente al objetivo de estudio, entonces la radiación reflejada por el objetivo es detectada y medida por el sensor (NASA, 2015).

El proceso de teledetección involucra la interacción de la radiación incidente con el/los objetivo(s) de interés: 1) en primer lugar es necesaria una fuente de energía que llegue al objeto de estudio (región de interés), 2) mientras la energía viaja de su fuente al objetivo interactúa con la atmósfera al atravesarla, así como cuando viaja de regreso desde el objetivo hacia el sensor, 3) una vez que la energía llega al sitio de estudio interactúa con este, esta interacción depende de las propiedades del sitio de estudio (IOPs) y las de la misma radiación (AOPs), 4) una vez que la energía ha sido dispersada y reflejada por el objetivo, el sensor recolecta y registra la radiación electromagnética que recibe, 5) los valores de energía tomados por el sensor deben ser transmitidos a una estación de recepción y procesamiento donde los datos son procesados para ser proyectados en una imagen, 6) la imagen procesada debe ser interpretada y proyectada digital o electrónicamente para extraer información del sitio de estudio a través de sus píxeles, 7) finalmente está la aplicación de las imágenes obtenidas por teledetección (desde la investigación científica, la legislación de leyes y políticas de conservación, hasta el

planeamiento urbano y de cambio de uso de suelos (Canada Centre for Mapping and Earth Observation, 2016).

2.3.1 Eutrofización, Color del Agua y Sensores Remotos

En el mapa hidrológico del mundo la eutrofización se ha convertido en el principal problema de calidad del agua (Khan, *et al.* 2014). Los lagos contienen casi el 90% de toda el agua dulce disponible en la superficie terrestre (Duker y Borre, 2001), sin embargo, todos ellos presentan algún grado de eutrofización principalmente por N y P (nitrógeno y fósforo). Bennet *et al.*, (2001) estimaron que el almacenamiento de P en ecosistemas terrestres y de agua dulce ha aumentado al menos un 75% en comparación con los niveles preindustriales. Señalaron que una gran porción de este P acumulado proviene de suelos destinados a la producción agrícola. Estimaciones en áreas agrícolas de países en vías de desarrollo y desarrollados mostraron que la tasa de acumulación de P está disminuyendo en los países desarrollados, pero aumentando en los países en vías de desarrollo. Todas las actividades que se realizan en el área alrededor de los lagos se reflejan directa o indirectamente en la calidad del cuerpo de agua (Khan, *et al.*, 2014). Según Khan *et al.*, (2014), los lagos Taihu y Baiyandian en China, Chapala en México, Yamoussoukro en el Oeste de África, así como varios lagos en Asia, Europa, Norte y Sur América se encuentran en niveles muy altos de eutrofización debido a la escorrentía de N y P desde las tierras de cultivo circundantes. En América Latina la contaminación de lagos y acuíferos representa uno de los mayores problemas del dilema ambiental, la degradación de los recursos hídricos es una constante que presentan todos los países (Guzmán, 2008). En la clasificación mundial, México está considerado como un país con baja disponibilidad de agua, mientras que los países más ricos en disponibilidad de este compuesto son Canadá y Brasil (Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C., 2006). Actualmente se calcula que al menos el 94% de los ríos y lagos de México presentan algún grado de contaminación, amenazando así el desarrollo de ciertas urbes y generando conflictos sociales en las regiones del país que enfrentan una mayor escasez de agua (Enciso, 2006).

Aunque en el mundo hay algunos registros de lagos en los que se pudo revertir la eutrofización (Schlinder, 2012), este proceso es muy costoso, por lo que es recomendable monitorear de forma constante la calidad del agua los lagos para implementar medidas de prevención. En este sentido,

la teledetección tiene el potencial de proveer información sinóptica sobre la calidad del agua, particularmente, la distribución espacial de fitoplancton (Tyler, 2006), el cual incrementa su producción en ambientes eutrofizados.

La teledetección se ha usado en diversos estudios para determinar la productividad primaria en lagos, y otras aguas costeras, a partir de los índices de reflectividad de la clorofila y otros pigmentos contenidos en el agua (Kutser, 2004 y Kutser *et al.*, 2006). Esta estimación remota de los constituyentes del agua se basa en la relación entre la energía incidente y las propiedades ópticas inherentes del cuerpo de agua (Gitelson *et al.*, 2009). Muchos estudios han sugerido que estimar concentraciones de Cl-a basados en mediciones de espectroscopia remota puede ser posible con proporciones adecuadas de bandas espectrales y sus combinaciones (Torbick, 2013; Singh, 2014; Dalu, 2015; Masocha, 2017).

El sensor CZCS (Coastal Zone Color Scanner) empezó con las investigaciones de color del océano en 1970 a bordo del satélite Nimbus 7, el cual fue usado exitosamente para cuantificar concentraciones *in-situ* de clorofila fitoplanctónica de octubre de 1978 a junio de 1986. Actualmente, diferentes sensores se han utilizado para hacer esta determinación, entre los cuales están PROBA, MERIS y LANDSAT (Tenjo, 2012; Palmer *et al.*, 2015; Vincent *et al.*, 2004; Mayo *et al.*, 1995; Duan *et al.*, 2010; Tenjo *et al.*, 2014). A su vez se investigan métodos para estimar dichas concentraciones; desde 1970 se han desarrollado diferentes algoritmos para Cl-a, la mayoría de estas ecuaciones se derivan por regresiones entre la radiancia y la concentración de Cl-a (O'Reilly, 1998). Dicho método relaciona las mediciones de reflectancia con las concentraciones de Cl-a a partir de modelos de reflectividad y ecuaciones empíricas (Duan *et al.*, 2010b).

Sin embargo, todos estos algoritmos han sido desarrollados para cuerpos de agua y temporadas particulares, por lo tanto, no pueden ser usados en todas partes ni en todas las temporadas del año (Kutser *et al.*, 2001). Los datos satelitales son medidas del flujo radiante (radiancia e irradiancia) que llega y sale de la Tierra, la cual varía según la latitud, temporada del año y hora del día (Brezonik *et al.*, 2005). Cuando varían las condiciones atmosféricas surgen muchas potenciales fuentes de error en las mediciones satelitales, las cuales afectan la cantidad de radiación solar que llega a la superficie del agua y la fracción de radiación que llega al sensor. En vista de esto, hay una clara necesidad de desarrollar y validar algoritmos específicos en

función de la época del año y la zona de estudio, especialmente en zonas con características particulares como lo son los cuerpos de agua continentales. Más importante que el uso operacional de los algoritmos en la investigación, el monitoreo y manejo de actividades, es necesario un riguroso análisis de validación para entender el funcionamiento asociado de interacción materia-energía, y de esta forma seleccionar el algoritmo o combinación de bandas adecuado para aplicar a un determinado cuerpo de agua con el fin de lograr recuperar la mayor cantidad de datos de los parámetros de interés (Palmer *et al.*, 2015).

Existen diversas investigaciones cuyo fin es desarrollar y/o validar algoritmos para la estimación de Cl-*a* para sitios específicos; Chen y Quan (2013) desarrollaron un algoritmo para estimar la concentración de clorofila del estuario del Río Amarillo (China) para sustituir el algoritmo de concentración global de Cl-*a* del sensor MODIS. La calibración y validación del algoritmo se realizó utilizando un conjunto de datos bio-ópticos compuesto por mediciones de radiancia espectral de surgencia y concentraciones de Cl-*a* colectada durante cruceros independientes en el estuario. En general, la concentración de clorofila calculada con el algoritmo resultó muy cercana a las mediciones *in-situ* utilizando las bandas $\lambda 443$ nm, $\lambda 748$ nm, $\lambda 551$ nm y $\lambda 870$ nm. Tenjo (2012) buscó una relación entre bandas que permita estimar el contenido de Cl-*a*, utilizando datos de reflectividad tomados de cinco lagos (ubicados en España y Colombia) con muy diferentes propiedades inherentes y contenido de clorofila. Se adquirieron imágenes del sistema CHRIS/PROBA así como del sensor HICO y se aplicaron diferentes algoritmos basados en combinaciones de 2, 3 y 4 bandas. Como resultado, se plantearon 6 índices para la estimación de Cl-*a* en aguas continentales. Jiménez (2013), relacionó las propiedades bio-ópticas del fitoplancton en el área marino-costera del Sistema Lagunar Navachiste, en Sinaloa México. Realizó cuatro muestreos en campo con 15 estaciones de muestreo, y obtuvo imágenes del sensor MODIS en los días correspondientes a los muestreos. El análisis de similitud realizado con variables físicas y biológicas dividió el área en tres zonas: dos con influencia costera y una oceánica. Hongtao Duan *et al.* (2010) usó como sitio de estudio el Lago Chagan en China para comparar una serie de algoritmos semi-empíricos de determinación de Cl-*a*. Utilizaron valores espectrales de campo tomados con un espectrómetro portable y muestras de agua para implementar el método espectrofotométrico estándar en la lectura de clorofila. En los resultados se encontró una mayor correlación en la longitud de onda $\lambda 680$ nm, además el modelo de dos bandas 'NIR/red' resultó ser también un predictor efectivo de Cl-*a*. Zhang *et al.* (2009),

utilizaron un amplio conjunto de datos bio-ópticos de teledetección para modelar la reflectancia en el Lago Taihu, un cuerpo extremadamente turbio y biológicamente productivo, en China. El modelo de 3 bandas ($[Rrs(\lambda_1) - Rrs(\lambda_2)] \times Rrs(\lambda_3)$) para estimar la concentración de Cl-a fue calibrado y validado. La evaluación detallada de la precisión del algoritmo indicó que utilizando bandas centrales de MERIS ($[Rrs(681) - Rrs(709)] \times Rrs(754)$) se puede estimar de forma precisa la Cl-a, con un elevado y significativo coeficiente de determinación ($R^2 = 0.92$) y un bajo error cuadrático medio ($RMSE = 17.0 \mu g \cdot L^{-1}$). Gitelson *et al.*, (2009) determinaron la capacidad del modelo de tres bandas ($\lambda 670$, $\lambda 710$ y $\lambda 750$ nm), y uno de dos bandas (rojo e infrarrojo cercano), para estimar la concentración de clorofila. El algoritmo de 3 bandas explicó más del 89% de la variación de Cl-a, mientras que el de dos bandas fue evaluado con un RMSE de $< 7.5 \text{ mg } m^{-3}$.

2.3.2 Serie LANDSAT

La serie Landsat (Land Remote Sensing Satellite Program) conforma un programa de observación de la Tierra creado por Estados Unidos y administrado por la NASA y el Servicio Geológico de dicho país (USGS). La construcción del primer satélite Landsat comenzó en la década de 1970, y se puso en órbita dos años más tarde por la NASA. Actualmente, la importancia de este programa es enorme, después de más de 40 años de haberse creado la serie Landsat (Figura 6) ha arrojado millones de imágenes de la superficie de la Tierra, teniendo el récord mundial en adquisición continua de imágenes de satélite y aportando importantes datos indispensables para agricultura, climatología, oceanografía, ingeniería civil, entre otras.



Figura 6 Cronograma de Satélites Serie LANDSAT (NASA, 2017).

Si bien las capacidades espectrales de los satélites utilizados en el trabajo del color del océano han mejorado significativamente en los últimos años, la aplicación de la teledetección remota a cuerpos de agua continentales aún permanece limitada por la necesidad de datos de imagen de alta resolución espacial, y por lo tanto queda limitada también por las capacidades de resolución espectral. Esto se convierte en un problema significativo al intentar cuantificar Cl-a en aguas caracterizadas por altas concentraciones de sedimentos suspendidos y heterogéneos, o cuando el área de interés está en una escala espacial pequeña (Tyler *et al.*, 2006). En consecuencia, las series de datos de la misión Landsat han sido utilizadas para numerosos estudios en aguas continentales debido a sus capacidades espectrales, a la anchura de su franja de barrido de 180 Km que garantiza la cobertura de los cuerpos de agua y a su adecuada resolución espacial de 30 metros (Tyler *et al.*, 2006). En la actualidad hay numerosas investigaciones sobre la detección de Cl-a satelital utilizando sensores de la serie Landsat.

2.3.2.1 Landsat Thematic Mapper

Los sensores de Landsat Thematic Mapper (TM) fueron diseñados principalmente para estudiar superficies terrestres y tienen varias limitaciones para caracterizar cuerpos de agua (Brivio *et al.* 2001). La relación señal-ruido para un sensor de recursos hídricos debe ser mayor que para un sensor de recursos terrestres, debido a los bajos valores de la radiación incidente que deja salir el agua (Brivio *et al.* 2001). El ancho de las bandas de TM no puede definir las características espectrales prominentes debido al espectro de absorción de la Cl-a, pues la absorción del pigmento en la región roja (de $\lambda 670$ a $\lambda 680$ nm) está solo contenido a medias en la banda del rojo ($\lambda 630$ - $\lambda 690$ nm), mientras que el pico cercano a los $\lambda 700$ nm queda totalmente fuera de la región del rojo de TM (Duan *et al.*, 2008). Por lo tanto, diferentes métodos deben aplicarse a los datos de TM para determinar la concentración de Cl-a.

Investigaciones previas sugieren que combinaciones de bandas incluyendo promedios, multiplicación y proporciones pueden proveer relaciones útiles (Duan *et al.*, 2007). Ya que la Cl-a actúa principalmente como absorbente diferencial, causando una disminución en la respuesta espectral principalmente en las longitudes de onda más cortas, o sea, en el azul del espectro y el sensor TM adquiere información espectral en las bandas ópticas (incluida la parte del azul) y en la región termal del espectro electromagnético, sus datos siguen siendo útiles para

desarrollar relaciones consistentes y de confianza entre sus bandas y la concentración clorofila, aún a pesar del ancho de sus bandas espectrales (Duan *et al.*, 2007).

Tabla 1. Algoritmos desarrollados para determinar Cl-a con LANDSAT Thematic Mapper.

Autor y año	Lugar	Algoritmo propuesto para Cl-a
Dalu <i>et al.</i> (2015)	Malilangwe, Africa.	$A * (\lambda_{485} - \lambda_{660} / \lambda_{560})$
Khattab <i>et al.</i> (2013)	Mosul Baghdad, Irak.	$X - Y(\lambda_{485} / \lambda_{560}) - Z(\lambda_{560} / \lambda_{485}) - C(\lambda_{560})$
Nas <i>et al.</i> (2010)	Lago Beyshir Turkía	$A - B * \lambda_{485} + C * \lambda_{560} + D * \lambda_{830}$

2.3.2.2 Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus

Una imagen Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), está compuesta por 8 bandas espectrales. Entre las principales mejoras técnicas respecto a Landsat TM, se destaca la adición de una banda espectral con resolución de 15 metros (banda pancromática). También, incluyó mejoras en las características geométricas y radiométricas y una mayor resolución espacial de la banda térmica para 60 m (Heckenlaible, 2008). Si bien, varios sistemas de teledetección fueron diseñados específicamente para monitorear la Cl-a en el agua oceánica (por ejemplo, CZCS, SeaWiFS) estos son mayormente útiles para aguas de caso 1 (océano profundo). Los datos de ETM+ son útiles para medir sistemas estuarinos por varias razones: los datos son económicos, disponibles rutinariamente y almacenados. A pesar de que la modesta resolución espectral de ETM+ para monitorear Cl-a, su resolución espacial y cobertura son adecuadas para monitorear lagos. Los datos ETM+ junto con muestras de agua *in-situ* proveen la media para establecer una relación entre los valores de reflectancia obtenida por el satélite y las concentraciones de Cl-a, así la distribución espacial y temporal de Cl-a puede ser estimada y cartografiada (Han *et al.*, 2005).

Tabla 2. Algoritmos desarrollados para determinar CI-a con LANDSAT Enhanced Thematic Mapper Plus.

Autor y año	Lugar	Algoritmo propuesto para CI-a
Singh <i>et al.</i> (2014)	Lago Sambhar, India	$A ((\lambda_{660} - \lambda_{482}) * \lambda_{825}) + B$
Torbick <i>et al.</i> (2008)	West lake, China	$A (\lambda_{661} / \lambda_{477}) - B$
Ma <i>et al.</i> (2005)	Lago Taihu, China	$-A + B (\lambda_{706} / \lambda_{682})$

2.3.2.3 Landsat Data Continuity Mission

La misión Landsat Data Continuity Mission (LDCM) incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a las de ETM+, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve. Por otra parte, el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+ (Ariza, 2013).

Tabla 3. Algoritmos desarrollados para determinar CI-a con Landsat Data Continuity Mission.

Autor y año	Lugar	Algoritmo propuesto para CI-a
Masocha <i>et al.</i> , (2017)	Lago Chivero y Mazvikadei, Africa.	Chivero: banda λ_{655} Mazvikadei: relación $\lambda_{865} / \lambda_{655}$
Yoshino <i>et al.</i> (2015)	Barra Bonita, Brasil.	Relación lineal y polinómica: $\lambda_{865} / \lambda_{655}$

2.3.3 Calibración radiométrica y corrección atmosférica

Los sensores satelitales capturan la información de la cobertura de la Tierra obtenida a partir de la intensidad de radiación electromagnética, misma que proviene de la luz del Sol reflejada sobre la superficie terrestre sumada a la energía dispersada y reflejada por la atmósfera. Esta información de intensidad es transformada mediante una ecuación lineal (Kruse, 2004) y almacenada en una representación discreta de números digitales (ND) que tienen una escala artificial definida según las características de almacenamiento de cada sensor específico, en el caso de LDCM de 12 bits; por esto es necesario convertir los datos de la escala ND a una escala espectral normalizada (Edwards, 1998). Para recuperar la radiancia (L) intrínseca del objeto de estudio a partir de la señal recibida por el sensor se requiere: 1) convertir los ND de cada banda a valores de L, 2) la L se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera (TOA, acrónimo en inglés de Top Of the Atmosphere) y 3) mediante Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) se realiza la conversión a valores de reflectancia (Kruse, 2004).

El proceso de calibración radiométrica permite convertir la información que el sensor entrega por cada pixel, la cual es recibida en ND a valores de radiancia espectral (L_λ), y posteriormente a reflectancia TOA captada por el sensor, de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$L_\lambda = G \times ND + B$$

Siendo L_λ la radiancia espectral obtenida por el sensor ($W m^3 sr^{-1} \mu m^{-1}$), ND los niveles digitales de la imagen, G la ganancia y B el sesgo (cuyos valores están presentes en el archivo “header” de cada imagen).

$$TOA = \frac{\pi \times L_\lambda \times d^2}{E_{0,\lambda} \cos \theta_s}$$

Siendo d: la distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresado en unidades astronómicas (ua), L_λ : Radiancia espectral calculada, $E_{0,\lambda}$: Irradiancia espectral exoatmosférica solar y θ_s : ángulo cenital solar.

La corrección atmosférica convierte la reflectividad aparente (TOA) a reflectividad de la superficie terrestre. El algoritmo de corrección atmosférica corrige la señal recibida por el sensor de la influencia y distorsiones radiométricas causadas por la atmósfera. El módulo FLAASH de ENVI es una herramienta de modelado para correcciones atmosféricas de primer principio. Éste módulo corrige las longitudes de onda en las regiones visibles a través del infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta, hasta 3 μm . El módulo FLAASH comienza con una ecuación estándar para L_λ en un píxel del sensor que se aplica al rango de longitud de onda solar (excepto la emisión térmica) y a los materiales lambertianos planos o sus equivalentes.

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B \rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a$$

Donde ρ es la reflectancia del píxel. ρ_e es un promedio de la reflectancia del píxel y la región que lo rodea. S es el albedo esférico de la atmósfera. L_a es la radiancia retrodispersada. A y B son los coeficientes que dependen de las condiciones geométricas y atmosféricas.

El algoritmo de transferencia de radiación MODTRAN4 desarrollado por Spectral Sciences Inc. (Kruse, 2004), se basa inicialmente en la ecuación estándar de radiancia espectral para cada píxel del sensor (Castillo, 2012). Los valores de A , B , S y L_a se determinan a partir de los cálculos de MODTRAN4 que utiliza los ángulos de visión y solares junto con la elevación media de la superficie la zona de estudio, y suponen un cierto modelo atmosférico, tipo de aerosoles y rango visible. Después de extraer el vapor de agua de la radiancia, la ecuación anterior es aplicada para las reflectancias de la superficie contenidas en píxeles en todos los canales del sensor. El método de solución implica calcular una imagen de L promediada espacialmente (L_e), a partir de la cual se estima la reflectancia promediada espacialmente ρ_e usando la ecuación:

$$L \approx \left(\frac{(A + B)\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a$$

2.4 Algoritmo (chlor_a OCx) OCEAN COLOR

Este algoritmo entrega la concentración de clorofila-a (mg/m^3) que hay en la superficie, dicha concentración es calculada usando una relación empírica derivada a partir de mediciones *in-situ* de Cl-a y reflectancias obtenidas a través de sensores remotos dentro de la zona azul-verde en

la región del espectro visible. El algoritmo es aplicable para todos los sensores actuales destinados a color del océano de modo que esta implementación del azul-verde depende de la disponibilidad de tres o más bandas en los sensores que abarquen el régimen espectral de λ 440- λ 670 nm. El producto “chlor_a” está incluido como parte de la “suite” de productos de nivel 2 para color del océano y en la “suite” de productos nivel 3 para clorofila en la plataforma NASA: Ocean Color Web (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

La implementación actual para el algoritmo predeterminado de clorofila (chlor_a) emplea el algoritmo estándar de dos bandas OC3/OC4 (OCx) combinado con el índice de color del océano (CI) de Hu *et al.* (2012). Este refinamiento está restringido para el agua relativamente clara y busca reducir impacto general de los defectos y sesgos en las mediciones de clorofila en aguas claras debido a destellos residuales, luz dispersa y errores en la corrección atmosférica.

2.4.1 Descripción del algoritmo

El producto chlor_a combina dos algoritmos: uno es la relación OCx de O’Reilly (1998) el otro es CI de Hu *et al.* (2012). El algoritmo CI es un modelo de diferencia de reflectancia de 3 bandas que emplea la diferencia entre la reflectividad en la banda verde (λ 555) y una referencia formada linealmente entre las reflectividades de las bandas azul (λ 443) y roja (λ 670):

$$CI = Rrs(\lambda 555) - [Rrs(\lambda 443) + (\lambda 555 - \lambda 443) / (\lambda 670 - \lambda 443) * (Rrs(\lambda 670) - Rrs(\lambda 443))]$$

El algoritmo OCx es una relación polinómica de cuarto orden entre una relación de reflectividad y CI-a.

$$\text{Log}_{10}(\text{chlor_a}) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \left(\text{Log}_{10} \left(\frac{OLI \lambda 480}{OLI \lambda 560} \right) \right)^i$$

En los productos nivel 2 y 3 de Ocean Color el algoritmo CI es utilizado para resultados de clorofila menores a 0.15 mg/m^3 , mientras que para resultados de clorofila por encima de 0.2 mg/m^3 se usa el algoritmo OCx. Cuando se trata de valores entre $0.15-0.2 \text{ mg/m}^3$, el algoritmo CI y el OCx son mezclados mediante un enfoque ponderado.

Tabla 4. Coeficientes específicos (a_0 - a_4) propuestos por NASA Ocean Color para el sensor OLI, empleando el algoritmo OCx de dos bandas.

	Sensor	Azul	Verde	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
OC2	OLI	$\lambda 482$	$\lambda 561$	0.1977	-1.8117	1.9743	-2.5635	-0.7218

2.4.2 Algoritmos de determinación de clorofila para SeaWiFS

En 1970, el sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) fue lanzado a bordo del satélite Nimbus 7; el algoritmo usado por el CZCS fue calibrado mediante la base de datos de radiancia-clorofila Nimbus Experiment Team, la cual contenía menos de 60 estaciones. Más de una década después del lanzamiento del CZCS fueron desarrollados muchos algoritmos para determinación de Cl-a, sin embargo, la precisión de estos algoritmos es limitada debido al número limitado de mediciones de radiancia y Cl-a *in-situ* coincidentes con los datos satelitales (O'Reilly *et al.*, 1998).

En 1997 el equipo SeaBAM se propuso encontrar algoritmos para detectar Cl-a y feopigmentos para el uso operacional del sensor SeaWiFS, estos algoritmos debían ser lo suficientemente precisos para comparar una gran diversidad de condiciones ópticas pues serían usados para procesar datos a escala global rutinariamente. Para lograr esta meta se compiló la base SeaBAM (SeaWiFS Bio-optical Algorithm Mini-Workshop) a partir de varias fuentes de datos, y se desarrollaron los criterios para una evaluación de algoritmos objetiva. La base de datos SeaBAM contenía 919 estaciones de muestreo con valores de concentración de clorofila entre 0.019 y 32.79 μgL^{-1} . La mayoría de los datos provenían de aguas no polares de caso 1, solo 20 muestras correspondían a aguas costeras más turbias. Dos modelos semi analíticos y 15 empíricos fueron probados, sin embargo, se entregan únicamente los resultados de los algoritmos que representan un satélite o una forma funcional particular. En general todos los algoritmos presentaron buenos resultados, al menos en una parte de la extensa base de datos de concentraciones; las ecuaciones empíricas actuaron mejor que los modelos semianalíticos, y los criterios estadísticos y gráficos señalaron que aquellos algoritmos que usaron una formulación cúbica polinomial tenían un mejor desempeño.

Los modelos empíricos que fueron probados variaron en su formulación y complejidad pues fueron desarrollados y calibrados para ser usados en diferentes bases de datos, por lo tanto, no fueron comparables para decidir cuál era el mejor. Teniendo esto en cuenta, varias fórmulas empíricas simples fueron calibradas para la base de datos de SeaBAM. Los algoritmos POLDER, CalCOFI, Morel-3 y Morel-4 son ecuaciones polinómicas cúbicas (de tercer orden) y en general se desempeñaron mejor que la mayoría de los otros algoritmos probados, sin embargo, ninguno de encajó tan bien en los valores bajos de clorofila (O'Reilly *et al.*, 1998).

2.4.2.1 OC_2 , polinomio cúbico modificado

La inspección de los gráficos de dispersión y de cuartiles sugirió que la fórmula polinómica de tercer grado requería un coeficiente de correlación adicional que influenciara la forma de la curva en las concentraciones bajas de Cl-a pero que tuviera un efecto pequeño en las concentraciones altas (O'Reilly *et al.*, 1998). Dicha fórmula resultó en el algoritmo Ocean Color de dos bandas, el cual es un polinomio cúbico modificado (MCP, por el acrónimo en inglés de modified cubic polynomial). Este presentó buenos resultados en las evaluaciones estadísticas cuando se calibró para la base SeaBAM ($R^2=0.91$ y $RMSE=0.172$). La afinación del algoritmo implicó la determinación de coeficientes MCP utilizando rutinas de minimización iterativa.

$$C_a = 10 (a_0 + a_1 R_2 + a_2 R_2^2 + a_3 R_2^3) + a_4$$

Donde $R_2 = \log^{10} Rrs \frac{490}{555}$ y $Rrs \frac{\lambda_i}{\lambda_j}$ es una notación para la razón de banda $Rrs\lambda_i/Rrs\lambda_j$

2.4.2.2 OC_4 , algoritmo de relación de banda máxima

En la evaluación el algoritmo Global Processing Switching (GPs) obtuvo el mejor ajuste ($R^2=0.927$) entre la clorofila medida ($Cl_{in-situ}$) y la clorofila estimada (Cl_{Rrs}). La forma funcional de este algoritmo llamado OC_4 es una función cúbica modificada que relaciona cocientes de banda con clorofila. La diferencia significativa de los algoritmos previos es que el cociente de banda está determinado por cualquiera de las razones ($Rrs\lambda_{443}/Rrs\lambda_{555}$, o $Rrs\lambda_{490}/Rrs\lambda_{555}$, o $Rrs\lambda_{510}/Rrs\lambda_{555}$) que sea mayor. Después de calibrar el algoritmo para base SeaBAM el modelo presentó una mejora relativa al MCP con un $R^2=0.932$ y un RMSE de 0.156. De los 3 cocientes de banda considerados el $\lambda_{443}/\lambda_{555}$ fue el mejor para valores bajos

de $\sim 0.3 \mu\text{g/L}$; el $\lambda 490/\lambda 555$ fue mejor entre 0.3 y $\sim 1.5 \mu\text{g/L}$ y el cociente $\lambda 510/\lambda 555$ dominó cuando la concentración excedía los $\sim 1.5 \mu\text{g/L}$ (O'Reilly *et al.*, 1998).

2.4.2.3 OC₂V₂ (Maritorea & O'Reilly, 2000)

Se evaluó la precisión del algoritmo OC₂ para estimar clorofila empleando nuevas mediciones de (Cl_{in-situ}). Los resultados de esta evaluación muestran que el OC₂ estaba funcionando bien en general para las aguas de caso 1, con concentraciones de clorofila entre 0.03 y 1.00 mg/m³, pero tendía a sobreestimar la Cl-a en concentraciones altas. Se agregaron 255 estaciones nuevas al set de datos SeaBAM, esta nueva base fue usada para redefinir los coeficientes para la función polinomial cúbica modificada (MCP) del algoritmo OC₂ (Hooker *et al.*, 2000).

$$C_a = 10 (0.2974 - 2.2429 R_2 + 0.8358 R_2^2 + 0.0077 R_2^3) - 0.0929$$

$$\text{Donde } R_2 = \log^{10} Rrs \frac{490}{555}$$

2.4.2.4 OC₂V₄ y OC₄V₄ (O'Reilly, *et al.*, 2000)

Se muestran las actualizaciones realizadas para los algoritmos OC₂ y OC₄ realizadas a partir de una base de datos de 2,853 observaciones *in-situ* de Cl-a y reflectividad (2,804 después de descartar valores anómalos). Esta base representa una larga diversidad de provincias bio-ópticas cubriendo valores de concentración que van de 0.008 a 90.00 mg/m³. Las aguas oligotróficas e hipertróficas están bien representadas con 238 muestras $> 5.00 \text{ mg/m}^3$ y 116 menores de 0.05 mg/m³. El refinamiento del algoritmo incluyó la determinación de coeficientes para el modelo usando IDL (iterative minimization routines) (O'Reilly, 2000).

2.4.2.5 Polinomio de cuarto orden para el algoritmo OC₄ versión 4 (OC₄V₄):

$$C_a = 10.0 (0.366 - 3.067 R_{4S} + 1.930 R_{4S}^2 + 0.649 R_{4S}^3 - 1.532 R_{4S}^4)$$

Donde $R_{4S} = \log^{10} (Rrs \frac{430}{555} > Rrs \frac{490}{555} > Rrs \frac{510}{555})$ el argumento del algoritmo es una representación abreviada para el máximo de los tres valores. En la expresión R_{4S} la parte numérica se refiere al número de bandas usadas y la letra denota el código para un satélite en particular (S=SeaWiFS).

2.4.2.6 Ecuación polinómica cúbica modificada para el algoritmo OC₂ versión 4 (OC₂V₄):

$$C_a = 10.0 (0.319 - 2.336 R_{2S} + 0.879 R_{2S}^2 - 0.135 R_{2S}^3) - 0.071$$

$$\text{Dónde } R_{2S} = \log_{10}\left(\text{Rrs} \frac{490}{555}\right)$$

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El Lago de Santa María del Oro se encuentra a 750 metros sobre el nivel del mar dentro de una estructura volcánica, y diferentes autores lo han definido como una caldera, como lago cráter e incluso, según Armienta *et al.* (2008), como un maar, o sea, un cráter volcánico producido después de una erupción causada por agua subterránea que entra en contacto con lava caliente o magma (freático-magmática). SAMAO se localiza en la zona Occidental dentro del Cinturón Volcánico Mexicano en las coordenadas 21° 22' N y 104° 34' W, en el Estado de Nayarit como muestra la figura 7. Se trata de un lago endorreico de edad pleistocénica (Sosa-Nájera *et al.*, 2010) con un diámetro aproximado de 2 kilómetros, una superficie de área de 3.7 km² y una profundidad media de 58 m registrada durante el 2015.

SAMAO registró durante el período de 1981 al 2010 una temperatura media anual de 20.9 °C, siendo mayo el mes más cálido con una temperatura máxima mensual registrada de 35.6°C, mientras que en enero se presenta la mínima de 3.5°C (SMN, 2010) presenta un clima tropical sub-húmedo (templado-cálido subhúmedo (Serrano *et al.*, 2002) controlado por el desplazamiento anual de la zona de convergencia intertropical. La temporada de lluvias va de junio a octubre y su precipitación media anual va de 1214 a 1600 mm (Sosa-Nájera *et al.*, 2010; Serrano *et al.*, 2002). El lago tiene un régimen monomítico cálido, lo que significa que el agua de la columna se mezcla en invierno mientras que el resto del año se encuentra estratificada, sin embargo, en 2015 la estratificación se mantuvo durante el ciclo afectando la distribución de los nutrientes inorgánicos disueltos, el oxígeno y el pH (Salas, 2018). El pH de 8.7 en el agua del lago puede condicionar la vida de los organismos que lo habitan; esta elevación en el pH es propicia para florecimientos de cianobacterias que ocurren en el lago (Can, 2016; Hernández, 2016; Romero, 2016). La productividad biológica es baja excepto por florecimientos de microalgas durante los meses más cálidos (abril a agosto) (Armienta *et al.*, 2008). Entre las actividades económicas que se realizan en el lago se encuentra la pesca deportiva de lobina negra y pesca local de charales.

SAMAO es una zona importante para el abastecimiento de agua, acuicultura, agricultura de temporal y turismo. A pesar de la falta de conocimientos sobre la flora y fauna acuática, se especula que la región de los lagos volcánicos (incluyendo a Tepeltictic y San Pedro) es una zona de endemismo concentrado y de elevada biodiversidad (CONABIO, 2017).

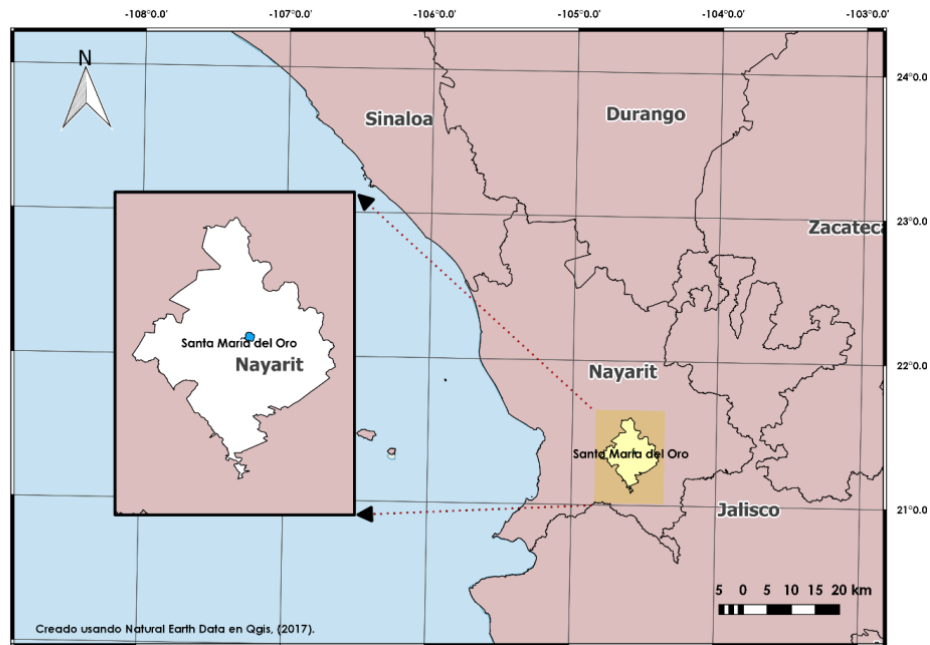


Figura 7 Ubicación del Lago-cráter de Santa María del oro en el Estado de Nayarit. Mapa realizado usando Natural Earth Data en Qgis.

3.2 Diseño de muestreo

La toma de muestras de campo se realizó mensualmente a lo largo del año 2015. Para ello se diseñó una red de 13 estaciones de muestreo abarcando orillas y centro del lago en las posiciones espaciales que muestra la figura 8. Para tener certeza de respetar la ubicación de las estaciones, en cada ocasión se geolocalizó la posición de la lancha durante la toma de muestra con un GPS portable. Las fechas de los muestreos y las coordenadas (UTM) de las estaciones se muestran las tablas 5 y 6.

Ya que el crecimiento del fitoplancton se limita generalmente a la capa superficial de los lagos (el epilimnion, de 5-25 m. en condiciones normales), que cuenta con mayor incidencia de luz y una temperatura más alta (Golterman y De Oude, 1991). Los muestreos de agua se realizaron superficialmente usando contenedores opacos con tapa limpios de aproximadamente 600 ml. Los envases contenedores de las muestras se refrigeraron y aislaron de la luz de forma inmediata después de la toma para su traslado al laboratorio y posterior procesamiento.

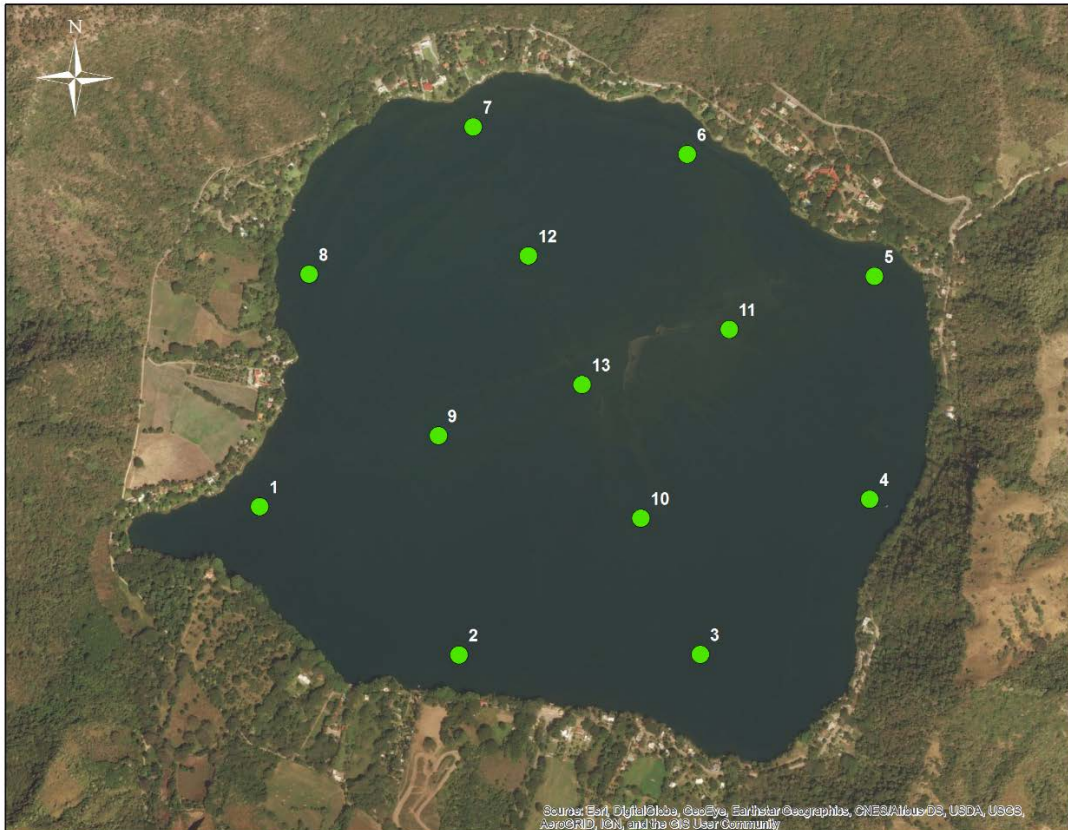


Figura 8 RGB Lago-cráter de Santa María del Oro mostrando ubicación espacial de las 13 estaciones de muestreo (mapa elaborado con el software ArcMap).

Tabla 5. Número y fecha de muestreo en SAMAO.

No. Muestreo	Fecha
1	31/01/2015
2	27/02/2015
3	25/03/2015
4	30/04/2015
5	29/05/2015
6	29/06/2015
7	01/08/2015
8	30/08/2015
9	30/09/2015
10	01/11/2015
11	30/11/2015
12	21/12/2015

Tabla 6. Número de ID y coordenadas UTM (zona 13) de las estaciones de muestreo en SAMAO.

Estación	Latitud	Longitud
1	543758	2362833
2	544309	2362397
3	544975	2362400
4	545441	2362859
5	545452	2363515
6	544935	2363873
7	544344	2363952
8	543893	2363518
9	544250	2363043
10	544810	2362801
11	545052	2363358
12	544497	2363573
13	544646	2363194

3.3 Tratamiento de muestras de clorofila

La determinación de la biomasa del fitoplancton en cuerpos de agua es más comúnmente realizada a partir de mediciones del contenido de Cl-a. Esta determinación se logra extrayendo la clorofila de las células con un solvente orgánico y midiendo su absorción en específicas longitudes de onda; entonces los valores resultantes se utilizarán en una fórmula derivada empíricamente (Strickland y Parsons, 1972) para determinar la concentración del pigmento. El procedimiento a utilizar sigue los lineamientos propuestos por Holm-Hansen *et al.*, (1965).

Para la filtración de la muestra se utilizó un equipo de filtración Millipore, diseñado para alojar filtros de 2.5 mm de diámetro, se filtraron las muestras de agua a través de una membrana de fibra de vidrio, con tamaño de poro de 0.7 μm , sobre la cual se retuvieron las partículas en suspensión. Se anotó el volumen de muestra filtrado y se mantuvo el nivel de vacío de la bomba <100 mm Hg para no romper las células. Los filtros fueron almacenados en papel aluminio rotulado y conservados a -20°C hasta el momento de la extracción.

3.3.1 Extracción de clorofila

Para llevar a cabo la extracción del pigmento, los filtros se colocaron a temperatura ambiente en un frasco ámbar de 20 ml y se agregó 10 ml de acetona al 90%, luego fueron refrigerados a 5 °C durante 24 horas. Una vez que el solvente actuó en las muestras, éstas se centrifugaron, cuidando siempre de no exponerlas a la luz. Se ajustó el volumen de la solución en los contenedores del equipo Labogene 1248R y se configuró la centrifugación a 4000 RPM con 20°C durante 10 minutos.

3.3.2 Cuantificación de Clorofila-a

Las concentraciones de Cl-a en SAMAO se obtuvieron mediante los métodos de espectrometría para los muestreos de enero a junio y por el método fluorométrico para los muestreos realizados entre julio a diciembre.

Espectrometría: Permite medir la intensidad de luz de una longitud de onda específica absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto. Las mediciones de absorción son utilizadas para cuantificar la concentración del soluto al aplicar una relación

empírica de los valores. Para realizar las lecturas se utilizó el equipo Genesys 8 modelo 100-240 de Thermo Spectronic. Se leyeron 2 ml de cada muestra 3 veces en 4 diferentes longitudes de onda (λ 750, λ 664, λ 647 y λ 630) y un blanco de 2 ml de solución de acetona al 90% entre cada lectura para calibrar el equipo.

Fluorimetría: Es un tipo de espectroscopia electromagnética que analiza la fluorescencia de una muestra. En esta técnica un haz de luz excita los electrones de las moléculas Cl-a y provoca que emitan luz de una menor energía, misma que a su vez es medida por el sensor del equipo. La lectura de las muestras se realizó con el equipo de Turner Design, Trilogy Fluorometer modelo 7200-000, empleando el módulo para clorofila no acidificada 'CHLA-NA' modelo 7200-046. Se leyeron dos mililitros de la muestra extraída en acetona al 90% usando el modo RAW Fluorescence del equipo, este realiza la medición en valores relativos a la fluorescencia en lugar de los valores de concentración absoluta. Las unidades de medición de los resultados obtenidos para estos valores son RFU (relative fluorescence unit), estos representan únicamente la luz colectada por el instrumento. RFU trata con fluorescencia: excitación y emisión, y no proporciona unidades físicas, sino que está relacionada con la respuesta del fluorómetro, lo que significa que esta medida depende en sí del instrumento.

3.3.3 Calibración del método

Se llevó a cabo la calibración del fluorómetro para convertir la señal de fluorescencia a unidades de concentración basado en el estándar que se use para calibrar. Las curvas de calibración son gráficos que muestran la respuesta de un método analítico (señal) en función de cantidades conocidas de análito (concentraciones). Este método se basa en la relación proporcional de la concentración de una solución y la señal que genera. Para realizarlas medimos el espectro de fluorescencia de compuestos estándar cuyo espectro de fluorescencia real ha sido determinado y reportado, después los factores de sensibilidad son calculados.

La calibración para el equipo de fluorimetría Trilogy modelo 7200-000 se realizó mediante una ampolla de 1 mg de clorofila-a estándar de *Anacystis nidulans* (producto C 6144 de Sigma-Aldrich, Inc.). La solución madre consistió en el estándar de la clorofila 1.00 mg diluido en acetona al 90% (obteniendo una solución final de 1000 μ g /L). La solución madre total se

almacenó en dos botellas ámbar de 0.5 L conservadas en refrigeración. El equipo utilizado permite almacenar un total de 20 curvas de calibrado cada una con 5 valores. Los datos y gráficos de evaluación a la curva de calibrado para aguas continentales se muestra en las tablas 7, 8, y en la figura 9.

Tabla 7. Resultados de los cálculos para la dilución de la solución madre en la curva de calibración para aguas continentales.

	Volumen de estándar (ml)	Volumen del matraz (ml)	Concentración final ($\mu\text{g/L}$)
1	2.5	250	0.10
2	10	100	1.00
3	0.55	50	10.00
4	1.38	50	25.00
5	2.77	50	50.00

Tabla 8. Resultados de la lectura fluorométrica y conversión a $\mu\text{g/L}$.

Conc.	RFU	($\mu\text{g/L}$)
0.10	0.53	0.7
1.00	3.56	3.4
10.00	31.86	32
25.00	83.6	81.5
50.00	166.96	169.2

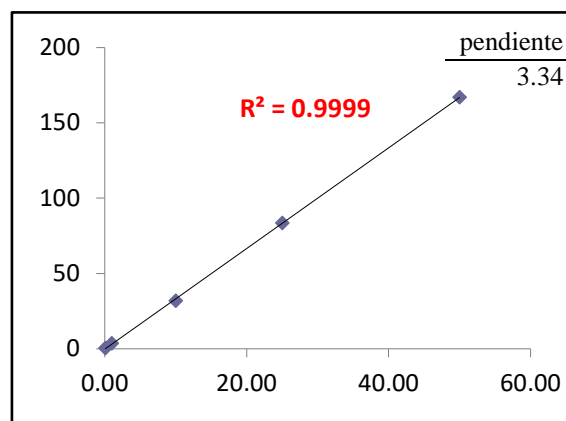


Figura 9 Evaluación de la curva de calibración para aguas continentales: análisis de regresión, coeficiente de determinación y pendiente de la recta.

3.4 Procesamiento de escenas

3.4.1 Adquisición de repositorio de imágenes satelitales

A través de la página <https://earthexplorer.usgs.gov/> del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, sus siglas en inglés) se obtuvieron las escenas de la misión LANDSAT LDCM disponibles de la zona de estudio para el año 2015. Debido a que el satélite barre la zona cada 16 días hay un producto aproximado de 2 imágenes espectrales de SAMAO por mes, sin embargo, se discriminaron las escenas que presentaron un nivel de nubosidad alto (mayor al 20%), así como las escenas cuya fecha de captura se encontraba más alejada de las fechas del diseño de muestreo. La lista de escenas LDCM usadas para realizar la validación y calibración se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Nombre y fecha de adquisición de las escenas LANDSAT utilizadas para la validación y calibración del algoritmo

ESCENAS LANDSAT	FECHA DE CAPTURA
LC80300452015030LGN00	30/01/2015
LC80300452015046LGN00	15/02/2015
LC80300452015062LGN00	03/03/2015
LC80300452015110LGN00	20/04/2015
LC80300452015142LGN00	22/05/2015
LC80300452015174LGN00	23/06/2015
LC80300452015206LGN00	25/07/2015
LC80300452015238LGN00	26/08/2015
LC80300452015270LGN00	27/09/2015
LC80300452015286LGN00	13/10/2015
LC80300452015334LGN00	30/11/2015
LC80300452015350LGN00	16/12/2015

3.4.2 Calibración radiométrica y corrección atmosférica

Se calcularon las radiancias a partir de los coeficientes de calibración del sensor Operational Land Imager (OLI), para esto se realizó una calibración radiométrica en todas las escenas descargadas utilizando el software especializado ENVI 5.3 (ENvironment for Visualizing Images), este sistema fue diseñado para abordar necesidades específicas de quienes usan regularmente datos satelitales de teledetección y aeronaves.

La corrección atmosférica para convertir la reflectividad aparente (TOA, por Top of the Atmosphere) a reflectividad de la superficie terrestre se realizó mediante el módulo Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) del software ENVI.

3.4.3 Extracción de datos de reflectividad

Se extrajeron los valores de tres bandas de la región visible del espectro electromagnético del sensor: OLI 2 (482 nm), OLI 3 (562 nm) y OLI 4 (655 nm). Para extraer los datos espectrales de los puntos de muestreo se utilizó la herramienta ROI (acrónimo para Regions Of Interest) por puntos del Software ENVI. Se ingresaron las coordenadas de las 13 estaciones de muestreo en el lago, la extracción se repitió en todas las escenas para tener una base de datos de reflectancias (Rrs) espectrales.

3.5 Validación del algoritmo

A partir de la base de datos espectrales extraídos de las escenas Landsat y la concentración de Cl-a medida *in-situ* en los 13 puntos de muestreo, se realizó la validación del algoritmo OC2 con el objeto de determinar el ajuste de los parámetros del algoritmo para las condiciones de la dinámica de SAMAO. Para esto se calculó el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2), realizando un diagrama de dispersión de los datos estimados por el algoritmo y los valores medidos en campo; para ello se implementó un script con el software MATLAB (MATrix LABoratory), el cual ofrece un poderoso lenguaje de programación con la posibilidad de manipular grandes bases de datos y realizar gráficas con relativa facilidad.

3.6 Calibración del algoritmo

La determinación de los coeficientes para el algoritmo OC2 que minimicen los errores en la estimación de la concentración de Cl-a en SAMAO se realizó en dos etapas: 1) Cálculo de los valores anómalos y 2) Calibración del algoritmo OC2 por mínimos cuadrados.

La detección de valores anómalos se realizó usando el método de validación cruzada “Leave One Out” (Efron, 1982). Esta metodología es ampliamente usada en caso de contar con pequeños números de muestras. Dado un conjunto de N datos, este método separa los datos en

N-1 elementos para entrenamiento y separa un valor para evaluar el modelo calibrado, permitiendo realizar N evaluaciones del modelo y tener N valores diferentes que permiten el cálculo de los estadísticos que determinan la capacidad de estimación del modelo evaluado. Se calibró el modelo OC2 con el método de mínimos cuadrados el cual entrega los cinco parámetros del modelo que minimizan los errores en la estimación. Con los valores estimados y medidos de concentración de Cl-a se obtuvo el error de la estimación (EE) según la siguiente ecuación:

$$EE = Cla_{campo} - Cla_{OC2}$$

Se realizó la identificación de datos atípicos a los errores encontrados por medio del método estadístico de los rangos intercuartiles según la siguiente fórmula:

$$ai \leq Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$$
$$as \geq Q_1 + 1.5(Q_3 - Q_1)$$

Donde *ai* son los valores atípicos inferiores, *as* valores atípicos superiores, Q_1 el primer cuartil y Q_3 el tercer cuartil. Identificados los valores anómalos se eliminaron de la serie de datos.

La figura 10 muestra el proceso iterativo usado para la eliminación de los datos fuera del rango de confianza establecido. Con la base de datos depurada se calibraron los parámetros del algoritmo mediante la técnica de mínimos cuadrados, donde una vez dado un conjunto de pares ordenados (Cl_{OC2} , variable dependiente “y” y Cl_{campo} , variable independiente “x”) y la función polinomial de 4° orden se encontró la función continua que mejor se aproximó a los datos de acuerdo con el criterio de error mínimo cuadrado. Para esto se implementó un script con el software MATLAB. El ajuste de la función encontrada se evaluó con el promedio de la suma del error cuadrático.

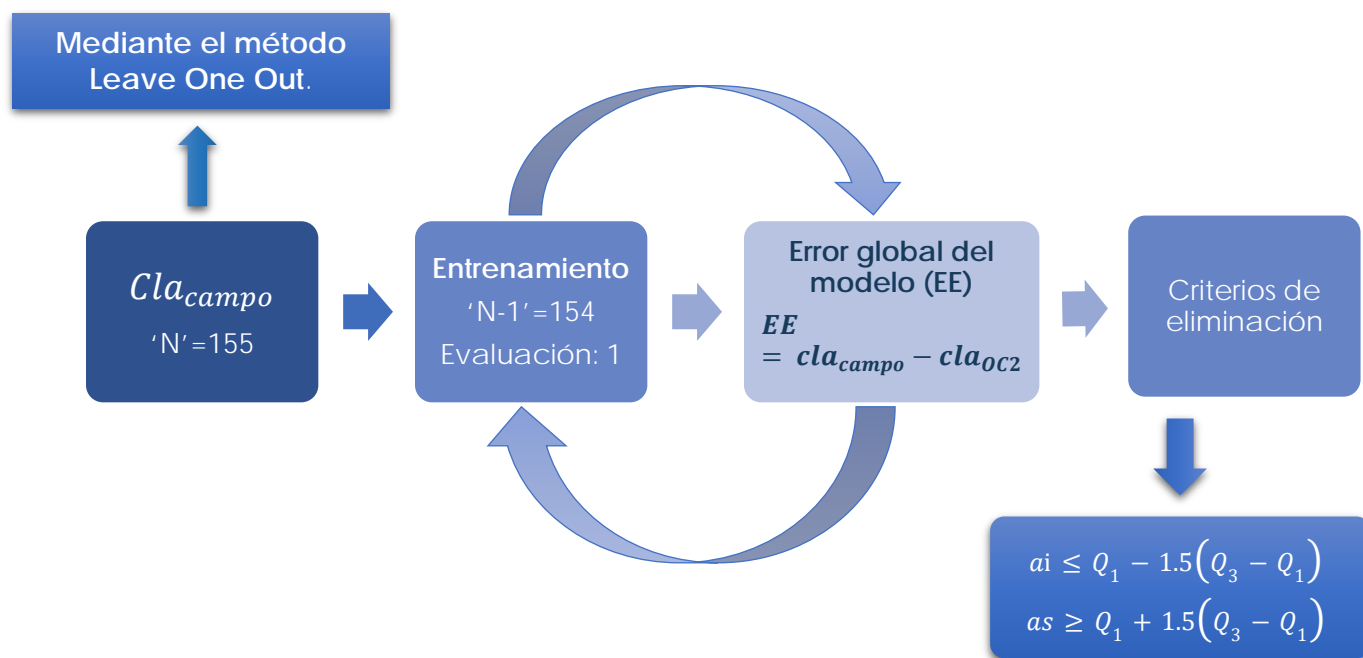


Figura 10. Esquema resumiendo la metodología realizada para la calibración de los nuevos coeficientes para el algoritmo OC2.

Con el modelo OC2 calibrado y los datos de reflectividad del sensor OLI de LDCM se calcularon el mapa de concentración de clorofila en SAMAO para los meses de marzo y agosto (2015) utilizando la herramienta band math del software ENVI.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de la concentración de clorofila *in-situ* en SAMAO

La figura 11 muestra la concentración de clorofila medida en laboratorio a partir de los métodos de espectrometría y fluorimetría de las muestras tomadas en la superficie del lago. El eje 'x' indica el número de cada estación de muestreo, mientras que en el eje de las 'y' se identifican los meses de realización de cada muestreo. Se observa que la mayor variabilidad en la concentración de clorofila se encuentra en los primeros 4 meses del año, aunque noviembre y diciembre muestran resultados más homogéneos se pueden distinguir del bloque de meses 5 a 10 donde la mayoría de los valores están por debajo de 2 $\mu\text{g/L}$.

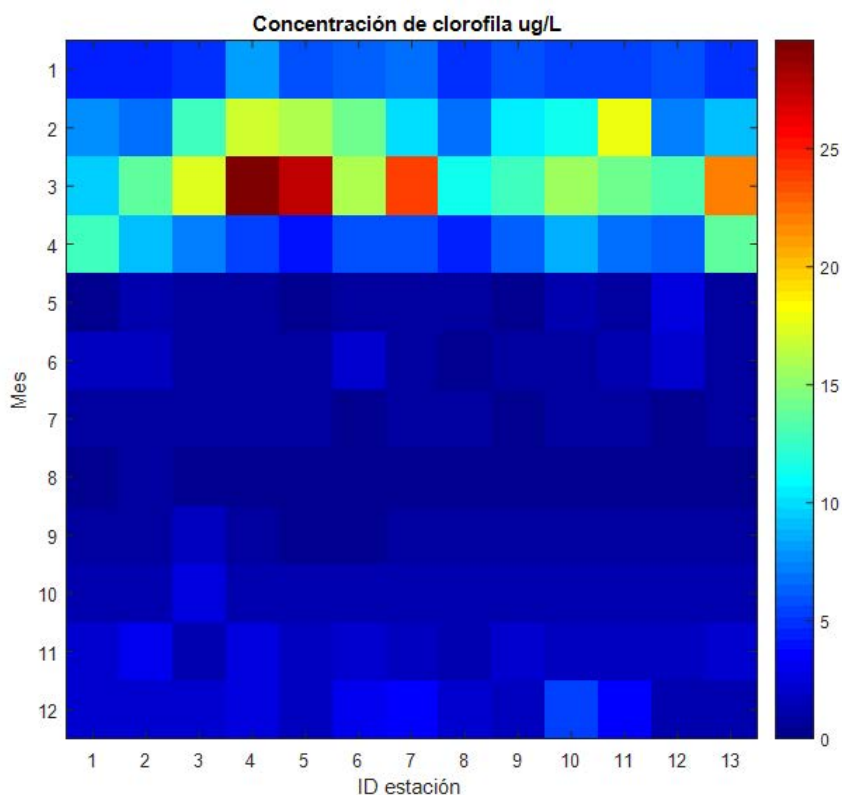


Figura 11. Concentración de Cl-a ($\mu\text{g/L}$) medida durante el año 2015 en el Lago de Santa María del Oro.

La figura 12 muestra la distribución temporal de la estación de muestreo No. 13, la cual se tomó como representativa de la producción primaria en SAMAO. Las concentraciones más altas de Cl-a fueron durante el mes de marzo con un promedio de 17.38 $\mu\text{g/L}$ con las 13 estaciones; mientras que la concentración más baja fue en el mes de agosto con 0.38 $\mu\text{g/L}$.

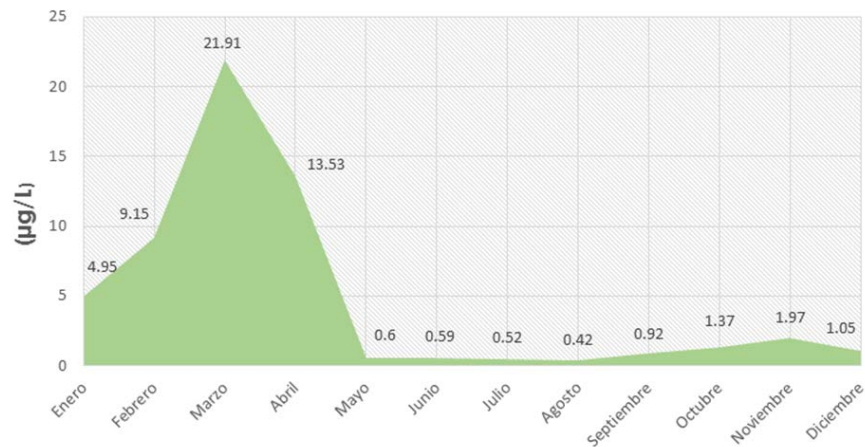
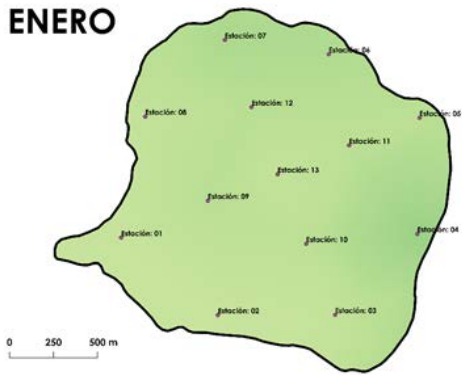


Figura 12. Temporalidad de la concentración de clorofila ($\mu\text{g/L}$) en SAMAO durante el año 2015 para la estación de muestreo No. 13.

De acuerdo a las mediciones de Cl-a realizadas podemos definir dos estacionalidades de productividad en la zona superficial del lago: el primer período es de mayo a diciembre con niveles de concentración de Cl-a bajos, en promedio 0.905 $\mu\text{g/L}$, y una desviación estándar de 2.51; el segundo período va de enero a abril con concentraciones altas, en promedio 10.4 $\mu\text{g/L}$, y una desviación estándar de 6.01.

Las figuras 13 y 14 muestran la distribución espacial de la concentración de clorofila para el período del estudio. Usando técnicas de interpolación espacial con el programa QGis se simuló la distribución espacial a partir de los 13 puntos de muestreo. Los mapas muestran gráficamente la estacionalidad que presenta SAMAO, así como las regiones donde se concentra la mayor cantidad del pigmento.

ENERO



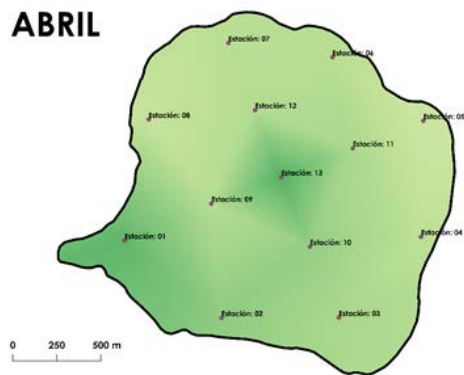
FEBRERO



MARZO



ABRIL



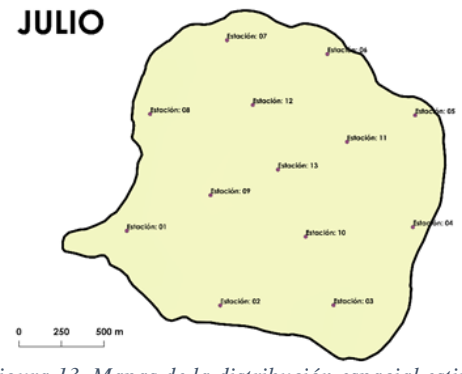
MAYO



JUNIO



JULIO



AGOSTO



Concentración (µg/L)

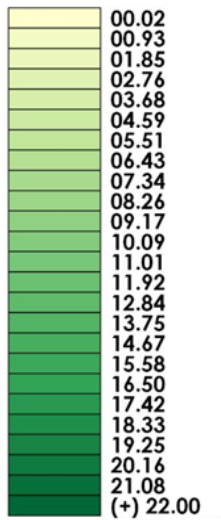
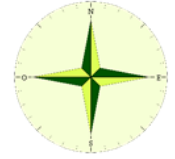
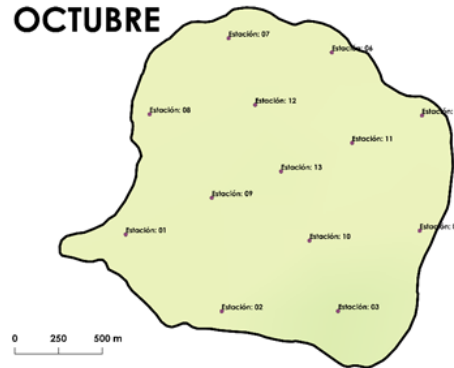


Figura 13. Mapas de la distribución espacial estimada con técnicas de interpolación para el año 2015.

SEPTIEMBRE



OCTUBRE



NOVIEMBRE



DICIEMBRE



Concentración ($\mu\text{g/L}$)

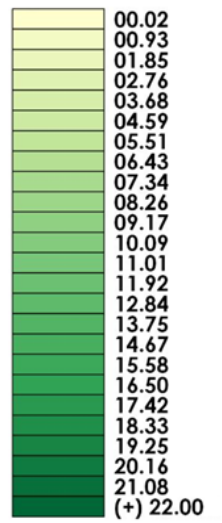


Figura 14. (Continuación) Mapas de la distribución espacial estimada con técnicas de interpolación espacial para el año de 2015.

4.2 Caracterización espectral

Las tablas y figuras 10, 11 y 15, 16 respectivamente, muestran los perfiles de reflectancia de las 13 estaciones de muestreo para los meses marzo y agosto.

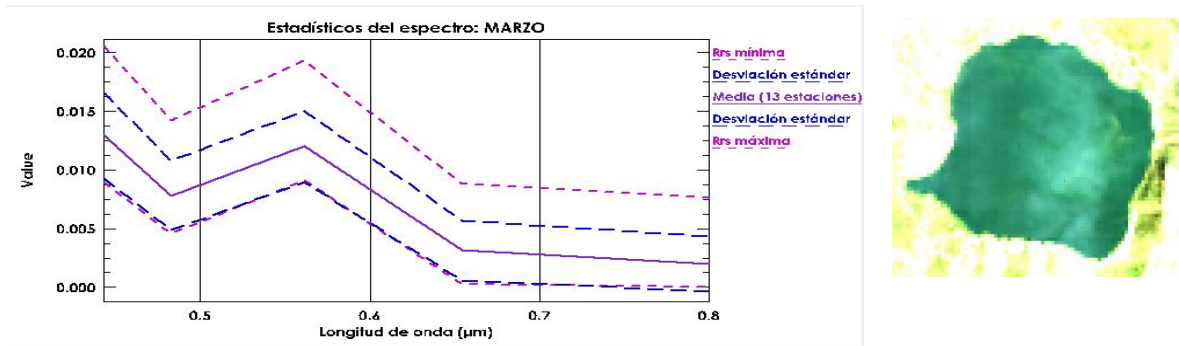


Figura 15. Estadísticos espectrales de la reflectancia en las 13 estaciones de SAMAO y recorte de escena obtenida con el sensor OLI para el mes de marzo del 2015. El eje 'x' representa las longitudes de onda y el eje 'y' la reflectancia obtenida después de la corrección atmosférica. Al costado derecho del gráfico, en las figuras, se encuentra el recorte de la escena LDCM correspondiente al mes de marzo, donde es posible observar la mancha de fitoplancton cerca del área de las estaciones 4, 6, 10 y 11 aproximadamente.

Tabla 10. Resumen de los estadísticos de media, desviación estándar, mínimo y máximo de las reflectancias en las estaciones de muestreo para el mes de marzo, los unidades de medición de los valores fueron dados por el software ENVI.

MARZO (λ nm)	Mínima	Máxima	Media	Desviación std. (σ)
1) λ 480	0.0046	0.0142	0.007815	0.002938
2) λ 560	0.0091	0.0193	0.012015	0.003015
3) λ 655	0.0003	0.0088	0.003138	0.00255
4) λ 865	0	0.0072	0.001562	0.002251

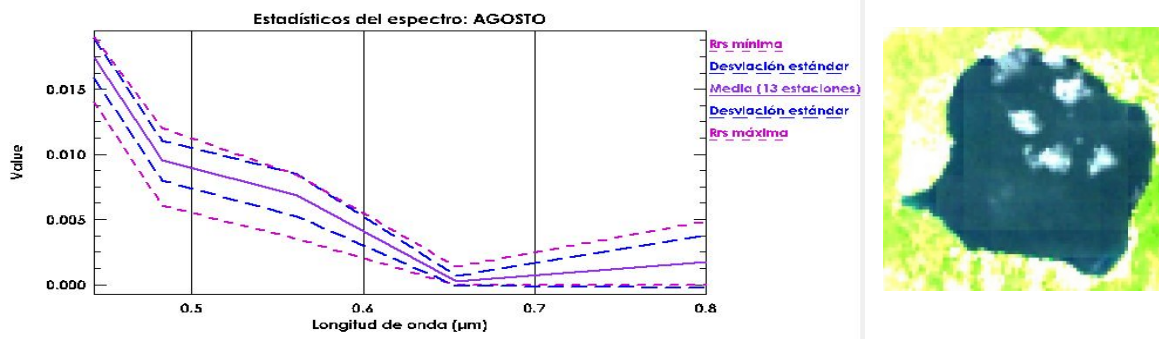


Figura 16. Estadísticos espectrales de la reflectancia en las 13 estaciones de SAMAO y recorte de escena obtenidas con el sensor OLI para el mes de agosto del 2015. El eje 'x' representa las longitudes de onda y el eje 'y' la reflectancia obtenida después de la corrección atmosférica. Al costado derecho del gráfico se encuentra el recorte de la escena LDCM correspondiente al mes de agosto, donde no es posible distinguir los posibles colores del agua en el cuerpo oscuro.

Tabla 11. Resumen de los estadísticos de media, desviación estándar, mínimo y máximo de las reflectancias en las estaciones de muestreo para el mes de Agosto. Las unidades de medición de los valores fueron dados por el software ENVI.

AGOSTO (λ nm)	Mínima	Máxima	Media	Desviación std. (σ)
1) λ 480	0.0061	0.012	0.009523	0.001543
2) λ 560	0.0035	0.0084	0.006838	0.001649
3) λ 655	0	0.0014	0.000262	0.000397
4) λ 865	0	0.0065	0.002485	0.002744

El análisis de la caracterización espectral del mes marzo indica un valor bajo en la longitud de onda 480 nm debido a la influencia del pico de absorción de la clorofila, mientras que presenta un incremento en la reflectancia entre las longitudes de onda 510-620 nm debido a la baja absorción de los pigmentos fitoplanctónicos junto con un incremento de retrodispersión ocasionado por partículas suspendidas (Duan *et al.*, 2010). Los valores bajos en los 620 nm son esperados debido a la absorción de las ficobiliproteínas de las cianobacterias (Matthews, 2016). En contraste, el espectro de reflectancia del mes de agosto presenta valores bajos en las longitudes de onda entre 510 y 620 nm y un incremento de reflectividad entre los 650 y 820 nm, estos valores pueden relacionarse con la presencia de sedimentos en suspensión y materia orgánica disuelta, denominada 'agua amarilla' según Ji *et al.* (2015).

4.3 Validación del algoritmo OC2

La figura 17 muestra el diagrama de dispersión entre los valores estimados por el modelo OC2 usando los parámetros propuestos por Ocean Biology Group (OBPG) y los valores obtenidos en campo. El coeficiente de determinación (R^2) resultó en 0.38 mientras que el error cuadrático medio (RMSE) presentó un valor alto de 6.42, esto indica que hay una baja correlación entre la clorofila medida en campo y la estimada por el modelo, de modo que estos resultados confirman la necesidad de realizar una calibración del modelo OC2 para las condiciones ópticas de SAMAO.

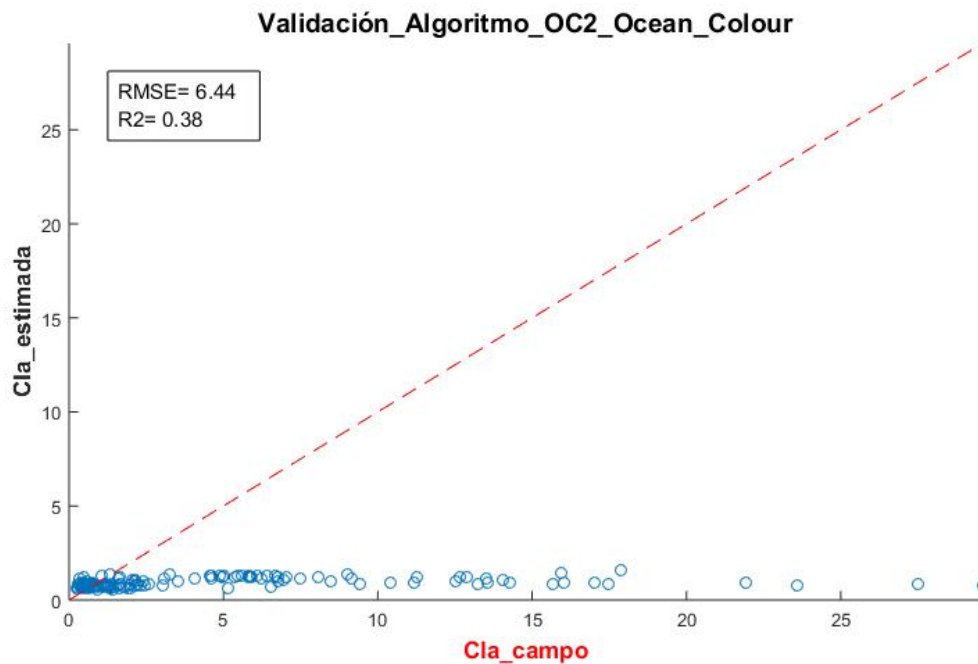


Figura 17. Análisis de regresión usado para determinar la correlación entre los valores estimados por el modelo OC2 y los valores obtenidos en campo. En el eje de las 'x' se encuentra la clorofila medida en laboratorio, la cual consideraremos como el valor real, en el eje de las 'y' se encuentra la clorofila estimada por el modelo, los resultados del análisis de regresión realizado para evaluar la correlación entre la clorofila medida (variable independiente) y la clorofila estimada (variable dependiente). Análisis y gráficos realizados con MATLAB.

4.4 Calibración del algoritmo

Debido a los bajos resultados de correlación obtenidos con la validación del algoritmo OC2 es necesario definir y proponer nuevos coeficientes para el polinomio de cuarto orden que estimen con mayor precisión la concentración de Cl-a a partir de datos satelitales. Para realizar esta calibración fue necesario depurar la base de datos de concentración de clorofila *in-situ* este cálculo y eliminación de valores atípicos se realizó mediante 5 iteraciones, al final de la última iteración la base de datos pasó de 156 a 104 valores con los cuales se obtuvieron los coeficientes propuestos para el algoritmo OC2 aplicado a SAMAO, los cuales se muestran en la tabla 7. El RMSE en la evaluación de éstos fue de 0.64, mientras que el R² resultó en 0.94, denotando una correlación satisfactoria entre la clorofila medida y la clorofila estimada.

Tabla 12. Coeficientes propuestos para determinar clorofila en SAMAO mediante el algoritmo OC2 aplicado a datos LDCM.

	Sensor	Azul	Verde	a0	a1	a2	a3	a4
OC2	OLI	482	561	1.2827	-17.7722	206.8681	-1180.3407	2145.9166

La función propuesta para la estimación de la concentración de Cl-a a partir del algoritmo propuesto por O'Reilly (1998) para SAMAO es el siguiente:

$$\log_{10}(Cl - a)OC_2 = 1.2827 - 17.7722 * \log_{10}\left(\frac{b1}{b2}\right) + 206.8681 * \log_{10}\left(\frac{b1}{b2}\right)^2 - 1180.3407 * \log_{10}\left(\frac{b1}{b2}\right)^3 + 2145.9166 * \log_{10}\left(\frac{b1}{b2}\right)^4$$

Donde $b1$ es la reflectancia medida por el sensor en la longitud de onda 482 (banda azul) y $b2$ es la reflectancia medida por el sensor en la longitud de onda 561 (banda verde).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos usando la metodología descrita en el capítulo anterior para la eliminación de valores anómalos. Los incisos 'a' presentan diagramas de cajas, donde el eje de las 'y' representa la concentración de Cl-a ($\mu\text{g/L}$), estos diagramas muestran la dispersión de los valores de la clorofila medida y los obtenidos con el modelo de la iteración. Los incisos 'b' muestran el error absoluto de cada uno de los datos, en el eje 'x' se encuentra la numeración de los valores, en el eje de las 'y' el valor de la diferencia entre ambas

bases de datos (Cl-a medida y Cl-a estimada). Los incisos ‘c’ contienen histogramas que presentan la frecuencia total de estos errores, en el eje de las ‘y’ se encuentra la frecuencia, mientras que el eje de las ‘x’ corresponde al rango de errores. En los incisos ‘d’ se realiza un diagrama de dispersión con el total de datos obtenidos durante la iteración, se calcularon el RMSE y R^2 para estos gráficos en cada una de las iteraciones.

Primera iteración

La primera iteración se realizó con 154 datos (debido a que previamente se detectaron y eliminaron un par de datos de reflectancia con valores infinitos). Después de calibrar el algoritmo OC2 con la base obtenida y la Cl-a medida se obtuvo un R^2 de 0.36 y un RMSE 5.49. Durante esta primera iteración fueron eliminados 33 datos anómalos.

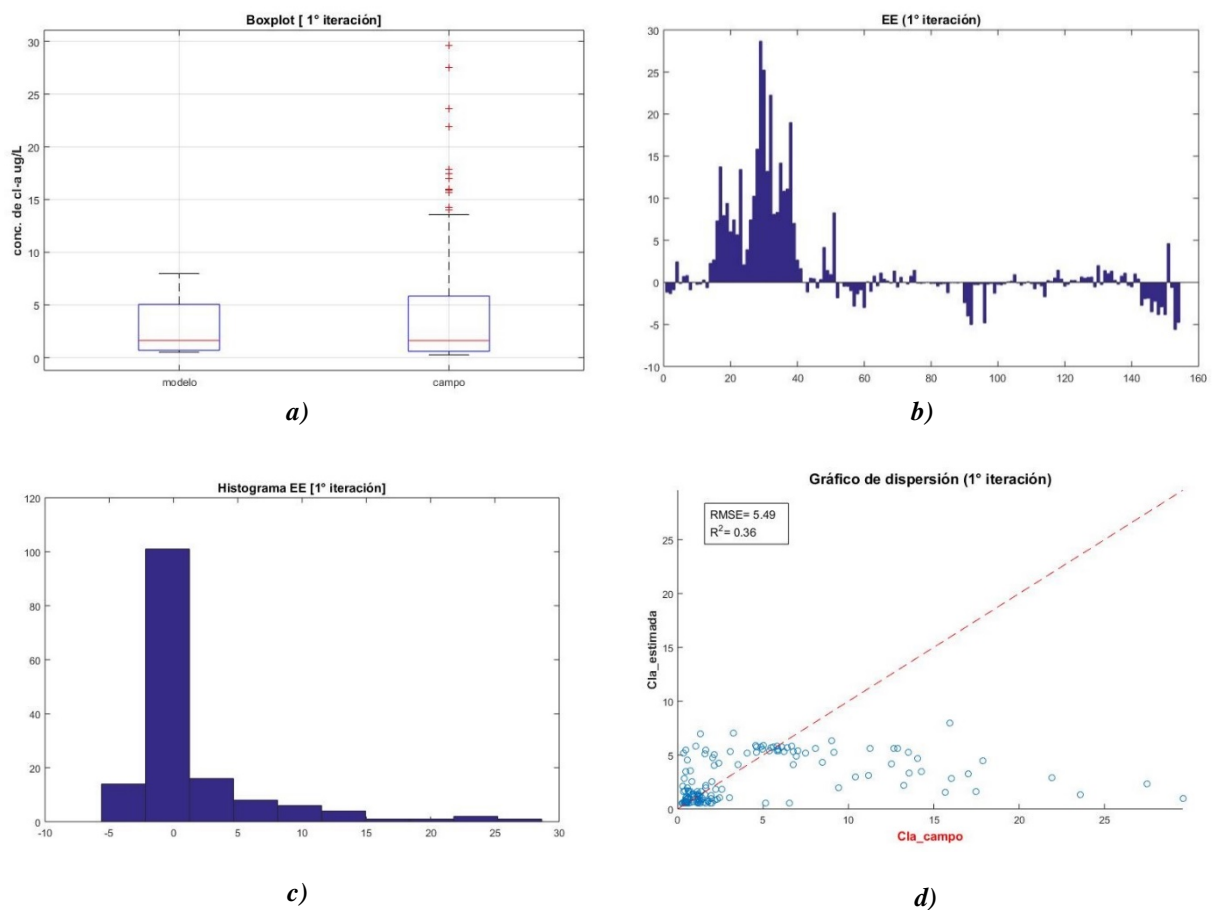


Figura 18. a) diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la primera iteración.

Segunda iteración

La segunda iteración se realizó con los 121 datos resultantes de la primera eliminación. Después de calibrar el algoritmo OC2 con la base obtenida mediante el método 'leave one out' y la CI-a medida se obtuvo un R^2 de 0.86 y un RMSE de 1.15. Los valores anómalos eliminados en esta iteración fueron 13.

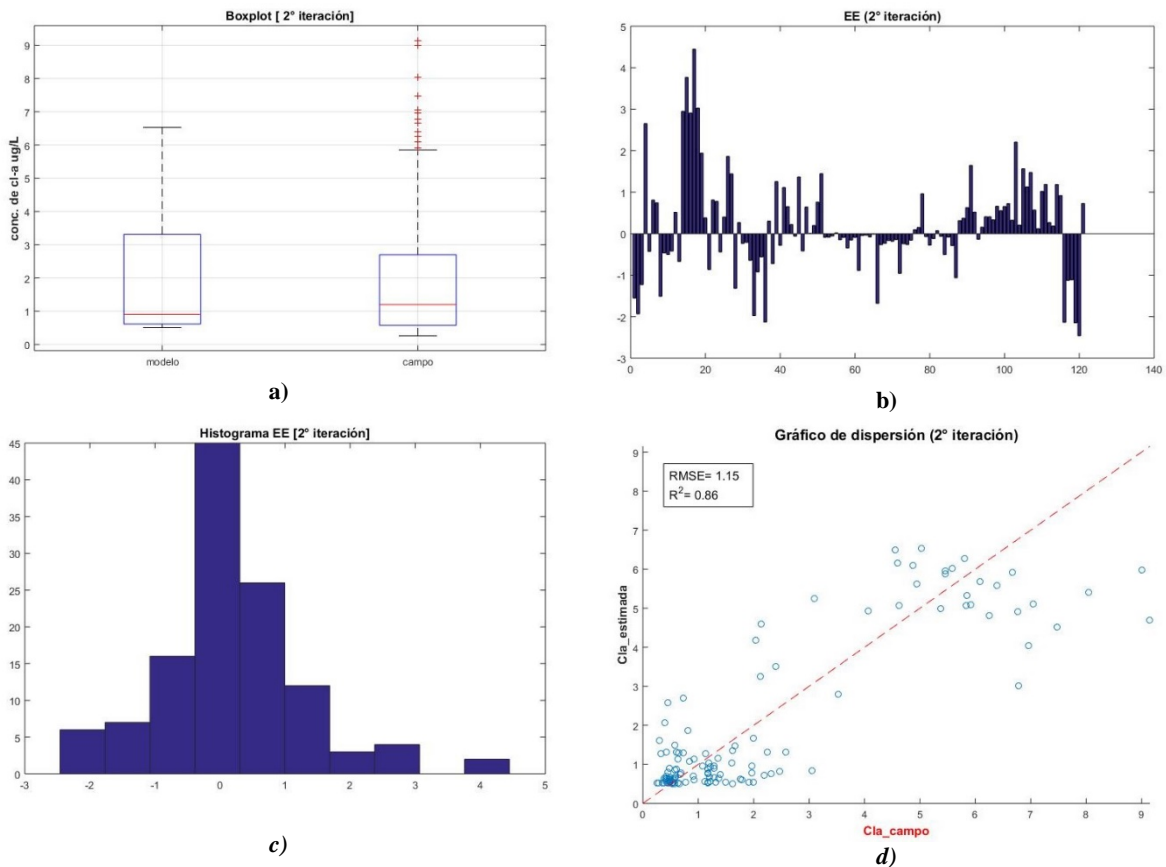


Figura 19. . a) diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la segunda iteración.

Tercera iteración

La tercera iteración se realizó con 108 datos. Se obtuvo un R^2 de 0.93 y un RMSE de 0.73. En esta iteración fueron 3 los valores identificados como anómalos y eliminados.

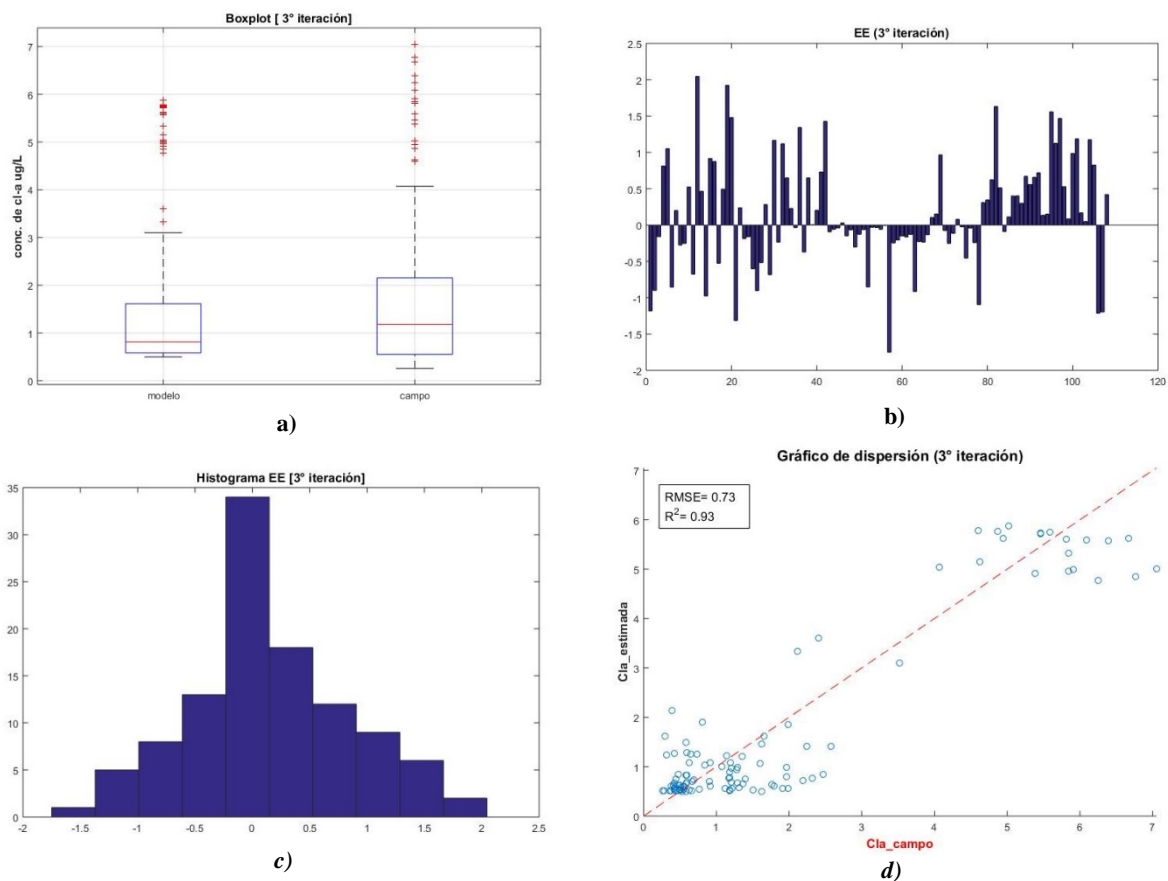


Figura 20. a) Diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la tercera iteración.

Cuarta iteración

La penúltima iteración se realizó con 105 datos. El valor R^2 obtenido fue de 0.93 y el RMSE de 0.65. En esta iteración sólo un valor fue depurado de la base de datos.

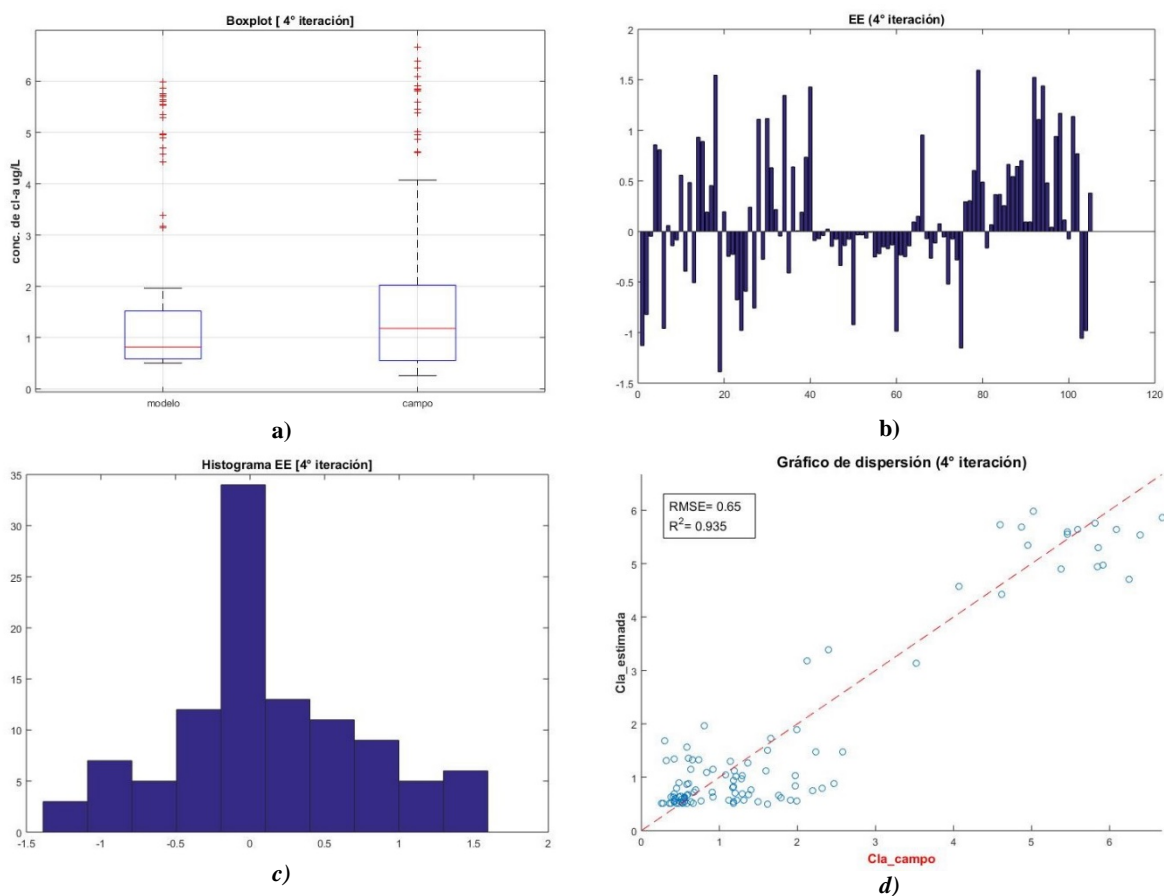
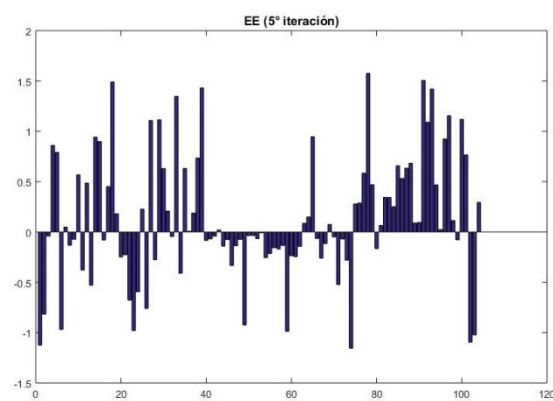
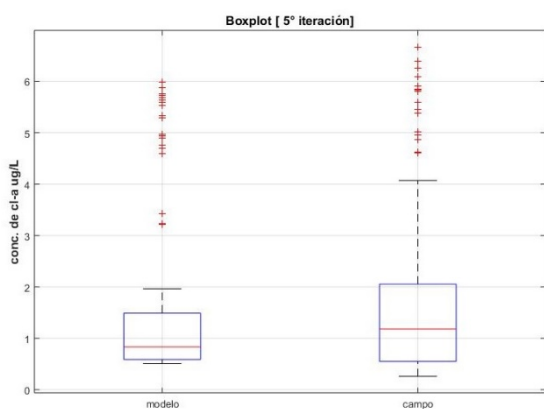


Figura 21. a) Diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la cuarta iteración.

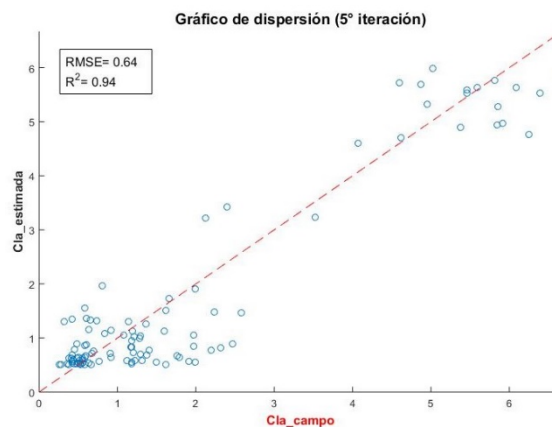
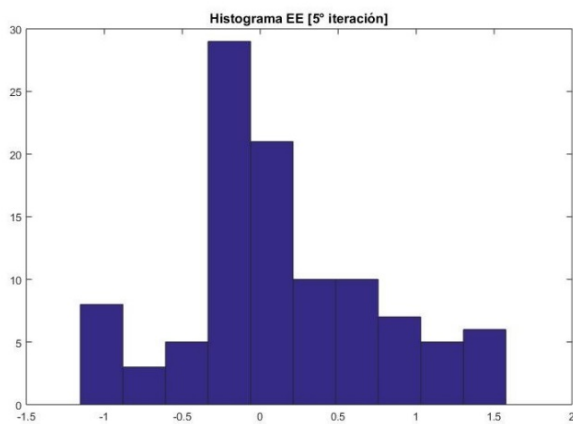
Quinta iteración

La quinta, y última iteración se realizó con 104 datos. El valor del R^2 obtenido fue de 0.94 y el RMSE 0.64 en esta iteración ningún valor quedó por fuera de los rangos de criterio de determinación de anómalos (± 1.5), así que se obtuvieron los coeficientes otorgados por el modelo calibrado en esta iteración (tabla 7) mismos que se proponen para aplicar al algoritmo OC2 en SAMAO.



a)

b)



c)

d)

Figura 22. a) Diagrama de cajas mostrando valores anómalos, b) diagrama de barras de los errores absolutos, c) histograma de frecuencias del error absoluto y d) gráfico de dispersión de los valores de la quinta iteración.

La figura 23 muestra por medio de un diagrama de cajas el impacto que tuvo la eliminación de los valores anómalos en la distribución de los errores, en donde a partir de la segunda iteración pasó de un RMSE de 5.49 $\mu\text{g/L}$ a 1.11 $\mu\text{g/L}$ terminado con un valor de 0.65 $\mu\text{g/L}$ tras eliminar 50 mediciones.

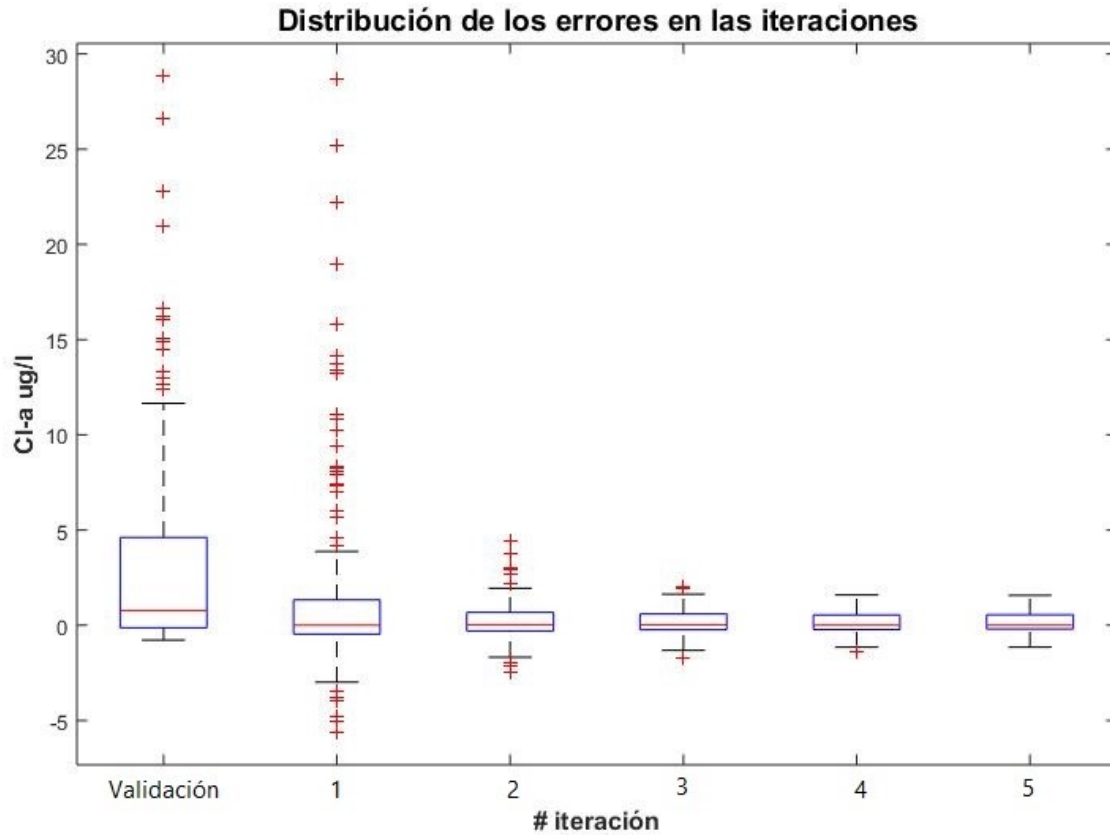


Figura 23. La distribución de los errores en la validación del algoritmo y en las iteraciones.

La figura 24 muestra la evolución de los estadísticos RMSE y R^2 usados para evaluar los parámetros de ajuste del modelo. Se observa que en la primera iteración de eliminación de valores anómalos, el coeficiente de correlación para los parámetros de ajuste originales del modelo son mejores que los calibrados, pero el RMSE disminuye un 10%. A partir de la segunda iteración el R^2 es superior a 0.85 y el RMSE inferior a 1 $\mu\text{g/l}$. A partir de la tercera iteración de eliminación de los valores anómalos el comportamiento del R^2 y el RMSE tienden a ser asintóticos.

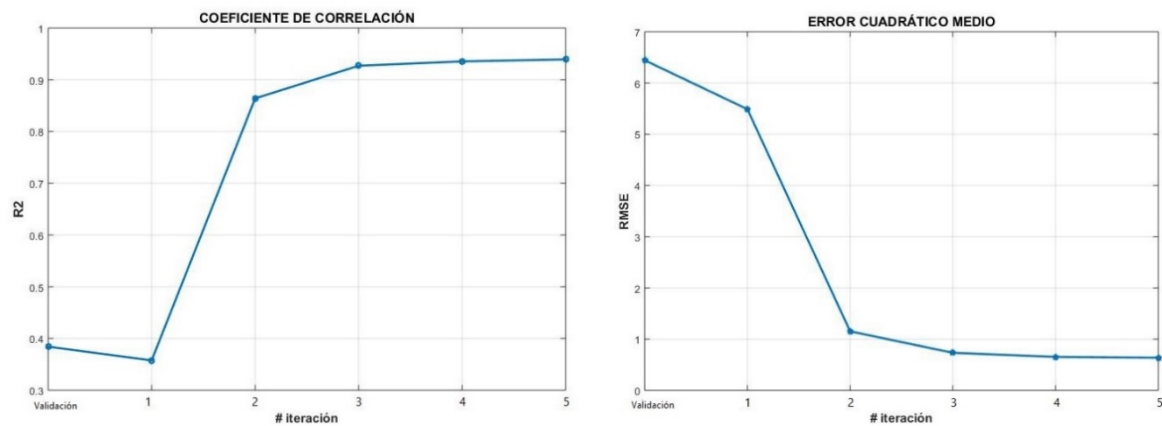


Figura 24. Las gráficas muestran los resultados del R^2 y el RMSE en la validación y por cada iteración realizada durante el proceso de calibración. En el eje de las 'y' se encuentran los valores de los estadísticos, en el eje de las 'x' el número de iteración.

La figura 25 muestra el análisis de la estacionalidad de los valores anómalos eliminados de la base de datos donde el 83% del total de éstos pertenece a la temporada de productividad alta y el 17% a los meses de mayo a noviembre que corresponden al período de baja productividad en SAMAO.

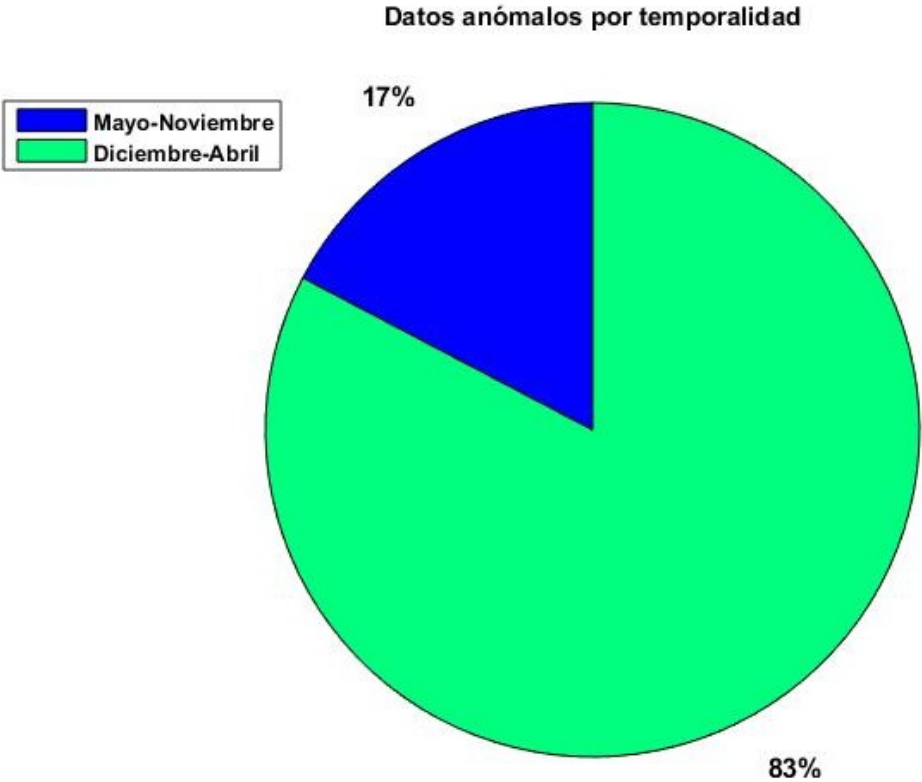


Figura 25. Gráfico circular del total de datos anómalos depurados.

La figura 26 muestra un gráfico de dispersión donde se compara el ajuste de los datos a la recta utilizando el algoritmo OC2 antes y después de calibrar. Los puntos azules señalan los resultados obtenidos con el algoritmo sin calibrar, y los resultados del rendimiento del algoritmo calibrado están marcados con asteriscos. El RMSE para la dispersión de los puntos evaluados sin la calibración resultó en 1.9, mientras que con la calibración obtuvo un valor de 0.64.

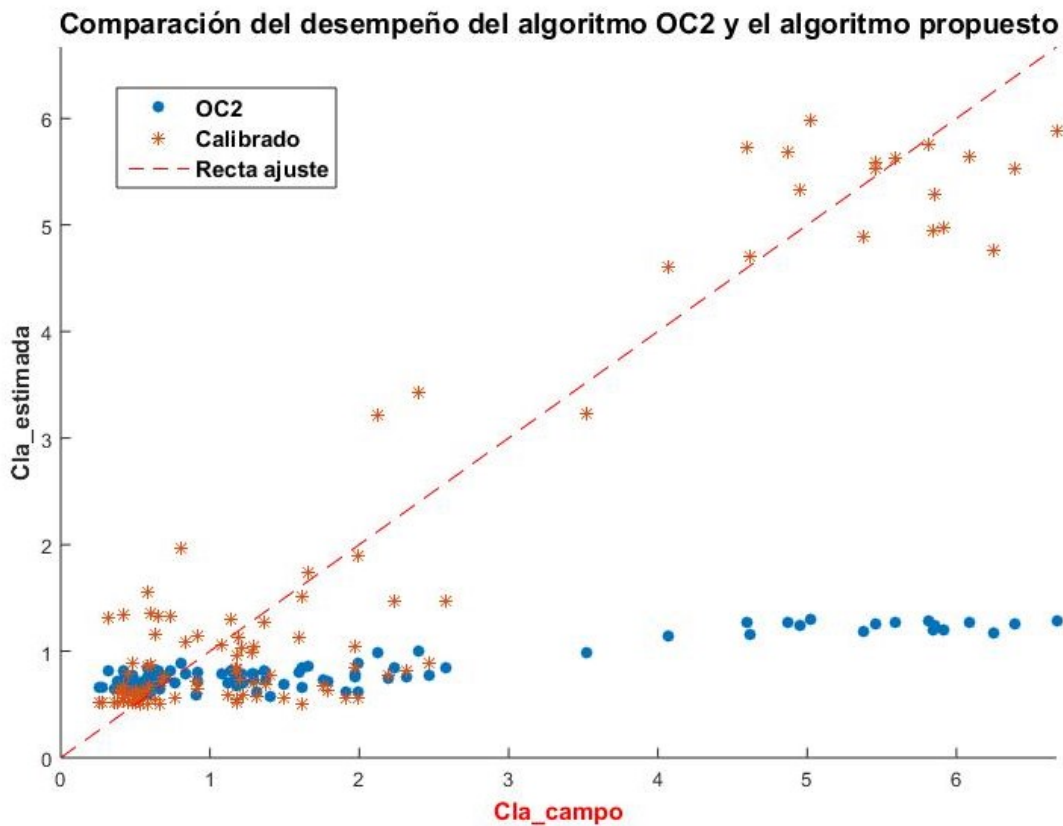


Figura 26. Gráfico de dispersión comparando el desempeño del algoritmo OC2 antes y después del proceso de calibración. Cálculo y gráficos realizados con MATLAB.

La figura 27 incluye un conjunto de mapas representando concentración de clorofila en SAMAO para los meses de productividad representativos. Los mapas fueron realizados empleando el algoritmo OC2 usando los coeficientes dados por O'Reilly (1998) y los propuestos en este trabajo.

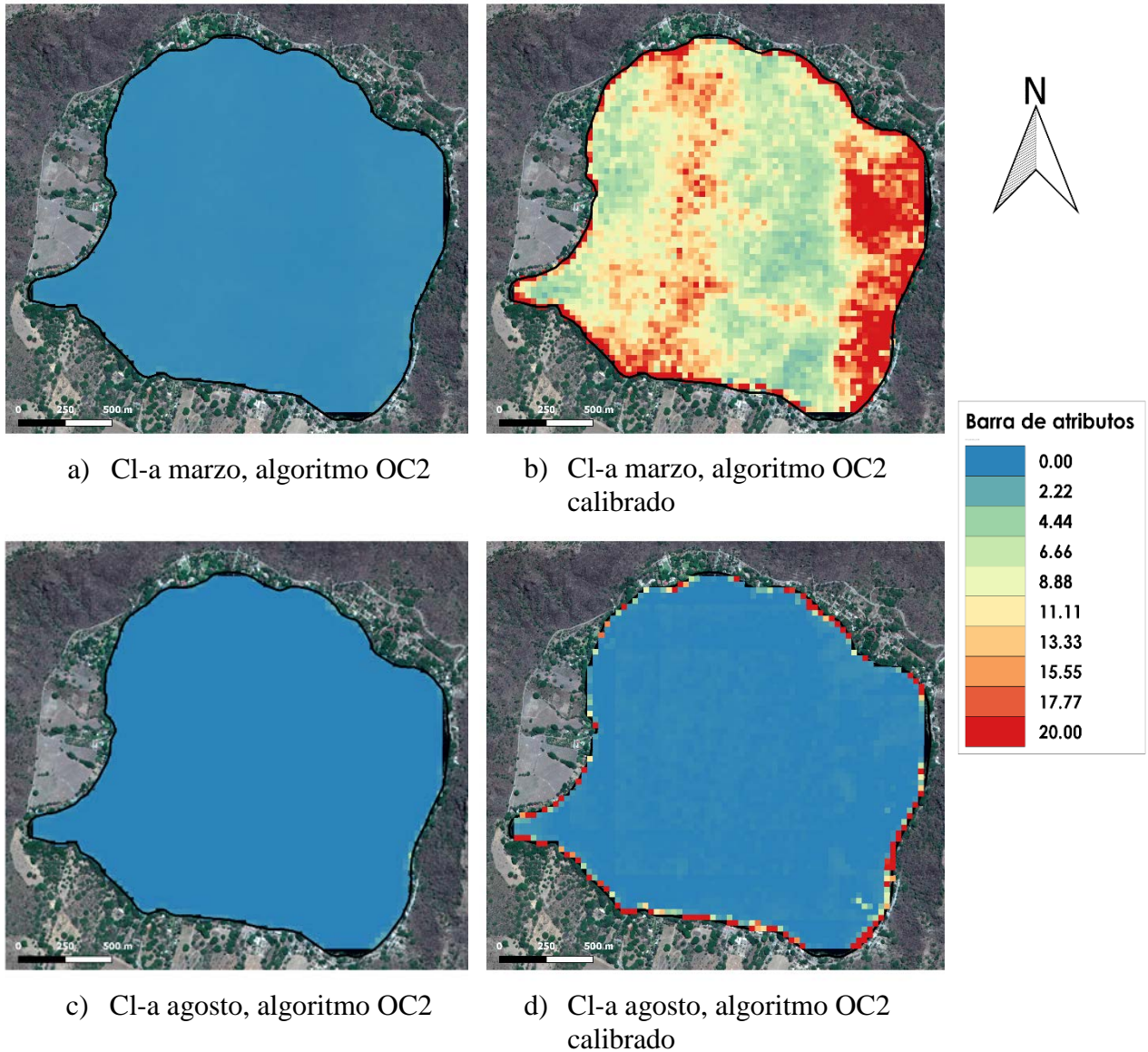


Figura 27. Mapas de Cl-a empleando el algoritmo OC2 para los meses marzo y agosto. En los incisos 'a' y 'c' se usaron los coeficientes empleados por Ocean Color para determinación de clorofila; en los incisos 'b' y 'd' se aplicaron los coeficientes obtenidos tras la calibración realizada al modelo para las condiciones de SAMAO.

Los resultados encontrados en este trabajo confirman el potencial que tienen los datos satelitales para el monitoreo de cuerpos de agua continentales, aunque la resolución del sensor OLI ha sido diseñada para el monitoreo de procesos terrestres, la información de éste puede ser utilizada para cuerpos de agua debido a sus capacidades espaciales, espectrales y radiométricas (Tyler *et al.*, 2006). Según Brivio *et al.* (2001) el satélite de teledetección más popular y con potencial para aplicarse al estudio de análisis de lagos es Landsat, debido a su relativo bajo costo, cobertura temporal, resolución espacial, y la disposición de los datos imágenes (Guan *et al.*, 2011). Landsat y otros satélites con alta resolución espacial seguirán siendo las únicas opciones para las mediciones basadas en satélites de las características de la calidad del agua de lagos pequeños en el futuro próximo (Brezonik *et al.*, 2005).

Sin embargo, el método de eliminación propuesto para este proyecto permitió identificar 50 valores anómalos de los cuales 80% corresponden a los meses de producción alta en el lago, por lo que es posible que el algoritmo calibrado tienda a subestimar los valores de concentración en estos meses. Puesto que el estado trófico de SAMAO es muy dinámico, se propone desarrollar en trabajos futuros una calibración o propuesta de algoritmo para cada temporalidad de productividad primaria presente en el lago.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

La cuantificación de la concentración de clorofila superficial permitió determinar dos ciclos definidos de producción primaria en el lago: uno alto de enero a abril y diciembre con un máximo de 29.6 µg/L en la estación 13; y un ciclo de producción primaria baja de mayo a noviembre con un máximo de 3.05 durante noviembre en la estación 2.

Los parámetros propuestos por Ocean Color para este algoritmo no son adecuados para estimar Cl-a en SAMAO. Sin embargo, después de llevar a cabo la calibración, el algoritmo funcionó satisfactoriamente con un RMSE de 0.64 y un R² de 0.94, lo que indica que un 94% de los valores están explicados por el modelo sugerido, por lo tanto la hipótesis planteada en este proyecto es correcta.

El presente trabajo propone nuevos coeficientes para ajustar la función polinomial de 4 órdenes a las condiciones ópticas de SAMAO con el propósito de estimar la concentración de clorofila.

$$\log_{10}(Cl - a)OC_2 = 1.2827 - 17.7722 * \log_{10}\left(\frac{b1}{b2}\right) + 206.8681 * \log_{10}\left(\frac{b1}{b2}\right)^2 - 1180.3407 * \log_{10}\left(\frac{b1}{b2}\right)^3 + 2145.9166 * \log_{10}\left(\frac{b1}{b2}\right)^4$$

REVISIÓN DE LITERATURA

Airs, R. L., Temperton, B., Sambles, C., Farnham, G., Skill, S. C., & Llewellyn, C. A. (2014). Chlorophyll f and chlorophyll d are produced in the cyanobacterium *Chlorogloeopsis fritschii* when cultured under natural light and near-infrared radiation. *FEBS letters*, 588(20), 3770-3777.

Álvarez de Cardozo Graciela (2017). *Funciones Algebraicas*, unidad 9. Centro Universitario de la Costa (Universidad Autónoma de Guadalajara). . Recuperado en noviembre del 2017 desde: <https://es.scribd.com/doc/7530735/FUNCIONES-ALGEBRAICAS>.

Ariza, Alexander. *Productos LDCM -Landsat 8*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi Bogotá, Colombia. 2013.

Armienta, M. A., Vilaclara, G., De la Cruz-Reyna, S., Ramos, S., Cenicerros, N., Cruz, O., ... & Arcega-Cabrera, F. (2008). Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(2), 249-258.

Bahamón, Nixon. (27 de mayo de 2004). *Aplicación De Aspectos De Oceanografía Óptica En Caracterización De Aguas Tipo I Y II*. Laboratorio de Ingeniería Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Consultado el 25 de noviembre de 2017 en: http://www2.ceab.csic.es/oceans/marinecometrics/site/docs_academics/Clase%20Bio-optica4_b.pdf

Bennett, E. M., Carpenter, S. R., & Caraco, N. F. (2001). Human Impact on Erodable Phosphorus and Eutrophication: A Global Perspective: Increasing accumulation of phosphorus in soil threatens rivers, lakes, and coastal oceans with eutrophication. *AIBS Bulletin*, 51(3), 227-234.

Blue Flag Global. *Laguna de Santa María del Oro*. Copenhagen SV, Dinamarca. Recuperado de <http://www.blueflag.global/show-site?siteId=10157>.

Bravo Carolina (24 de marzo, 2012). Concepto de Función Polinomial [Mensaje en un blog]. Funciones Polinomiales. Recuperado de: <http://ebmmatelv4c.blogspot.mx/2012/03/funciones-polinomiales.html#comment-form>.

Brezonik, P., Menken, K. D., & Bauer, M. (2005). Landsat-based remote sensing of lake water quality characteristics, including chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM). *Lake and Reservoir Management*, 21(4), 373-382.

Brivio, P. A., Giardino, C., & Zilioli, E. (2001). Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 22(2-3), 487-502.

Can A., 2016, agosto 08. Apoya la UAN preservación del lago Santa María del Oro. Entrevistador: Karina Gómez. Agencia Informativa Conacyt. Recuperado de: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/8980-apoya-la-uan-preservacion-del-lago-santa-maria-del-oro>

Canada Centre for Remote Sensing Fundamentals of Remote Sensing (2016) <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-airphotos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309>

Carpenter, S. R. (2005). Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102(29), 10002-10005.

Castillo Romero, O. G. Aplicación espectral y topológica en el procesamiento de imágenes satelitales. *Spectral and topological application on satellite imagery processing* (2012) (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales).

Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A. C., & Presencia Mexicana Ciudadana Mexicana, A. C. (2006). Agua en México: lo que todos y todas debemos saber. In *Agua en México: lo que todos y todas debemos saber*. Fondo Educación Ambiental.

Chen, J., & Quan, W. (2013). An improved algorithm for retrieving chlorophyll-a from the Yellow River Estuary using MODIS imagery. *Environmental monitoring and assessment*, 185(3), 2243-2255.

Chen, M., Li, Y., Birch, D., & Willows, R. D. (2012). A cyanobacterium that contains chlorophyll f—a red-absorbing photopigment. *FEBS letters*, 586(19), 3249-3254.

CONABIO, 2017. Lista De Las Regiones Hidrológicas Prioritarias. Última actualización: jueves 02 febrero, 2012. Consultado en: <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Hlistado.html>.

Dalu, T., Dube, T., Froneman, P. W., Sachikonye, M. T., Clegg, B. W., & Nhiwatiwa, T. (2015). An assessment of chlorophyll-a concentration spatio-temporal variation using Landsat satellite data, in a small tropical reservoir. *Geocarto International*, 30(10), 1130-1143.

De León, L. (2002). Floraciones de cianobacterias en aguas continentales del Uruguay: causas y consecuencias. *Perfil Ambiental del Uruguay*, 28-37.

Duan, H., Ma, R., Xu, J., Zhang, Y., & Zhang, B. (2010). Comparison of different semi-empirical algorithms to estimate chlorophyll-a concentration in inland lake water. *Environmental monitoring and assessment*, 170(1-4), 231-244.

Duan, H., Ma, R., Zhang, Y., Loiselle, S. A., Xu, J., Zhao, C., ... & Shang, L. (2010). A new three-band algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes. *Environmental Research Letters*, 5(4), 044009.

Duan, H., Ma, R., Zhang, Y., Loiselle, S. A., Xu, J., Zhao, C., ... & Shang, L. (2010) (b). A new three-band algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes. *Environmental Research Letters*, 5(4), 044009.

Duan, H., Zhang, Y., Zhang, B., Song, K., & Wang, Z. (2007). Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. *Environmental monitoring and assessment*, 129(1-3), 295-308.

Duan, H., Zhang, Y., Zhang, B., Song, K., Wang, Z., Liu, D., & Li, F. (2008). Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states for inland lakes in Northeast China from Landsat TM data and field spectral measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 29(3), 767-786.

Dube, T., Mutanga, O., Seutloali, K., Adelabu, S., & Shoko, C. (2015). Water quality monitoring in sub-Saharan African lakes: a review of remote sensing applications. *African Journal of Aquatic Science*, 40(1), 1-7.

Duker, L., & Borre, L. (2001). Biodiversity conservation of the World's Lakes: a preliminary framework for identifying priorities. *LakeNet Report Series*, 2.

Edwards, A. J. (1998). Lesson 3: Radiometric correction of satellite images: when and why radiometric correction is necessary. Recuperado de <http://www.ncl.ac.uk/tcmweb/bilko/module7/lesson3.pdf>

Efron, B. (1982). *The jackknife, the bootstrap, and other resampling plans* (Vol. 38). Siam.

Enciso, A. 2006, Marzo 06. México, segundo consumidor mundial de agua embotellada. *La Jornada*. Recuperado de: <http://www.jornada.unam.mx/2006/03/06/index.php?section=politica&article=005n1pol>

Evert, R. F. (2006). *Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*. John Wiley & Sons.

Frías Domínguez M. D., Fernández J. y Sordo C. M. (2012). *Estadística*. Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria, Open Course Ware. Recuperado en noviembre del 2017 desde: <http://docplayer.es/33970170-Estadis5ca>

maria-dolores-frias-dominguez-jesus-fernandez-fernandez-carmen-maria-sordo-tema-2-
modelos-de-regresion.html

Gan, F., Shen, G., & Bryant, D. A. (2014). Occurrence of far-red light photoacclimation (FaRLiP) in diverse cyanobacteria. *Life*, 5(1), 4-24.

Gilerson, A. A., Gitelson, A. A., Zhou, J., Gurlin, D., Moses, W., Ioannou, I., & Ahmed, S. A. (2010). Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands. *Optics Express*, 18(23), 24109-24125.

Gitelson, A. A., Gurlin, D., Moses, W. J., & Barrow, T. (2009). A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters. *Environmental Research Letters*, 4(4), 045003.

Golterman, H. L., & De Oude, N. T. (1991). Eutrophication of lakes, rivers and coastal seas. In *Water Pollution* (pp. 79-124). Springer Berlin Heidelberg.

González, M. P. (1992). Error cuadrático medio de predicción para modelos estructurales de series temporales. *Estadística Española*, 34(129), 117-136

Guan, X., Li, J., & Booty, W. G. (2011). Monitoring Lake Simcoe water clarity using Landsat-5 TM images. *Water resources management*, 25(8), 2015-2033.

Guzmán-Arias, I. (2008). Recursos hídricos en América Latina: planificación... es la estrategia. *Revista Tecnología en Marcha*, 21(1), 161-173.

Han, L., & Jordan, K. J. (2005). Estimating and mapping chlorophyll-a concentration in Pensacola Bay, Florida using Landsat ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(23), 5245-5254.

Hernández O. U., 2016, agosto 08. Apoya la UAN preservación del lago Santa María del Oro. Entrevistador: Karina Gómez. Agencia Informativa Conacyt. Recuperado de:

<http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/8980-apoya-la-uan-preservacion-del-lago-santa-maria-del-oro>

Holm-Hansen, O., Lorenzen, C. J., Holmes, R. W., & Strickland, J. D. (1965). Fluorometric determination of chlorophyll. *Journal du Conseil*, 30(1), 3-15.

Hooker, S. B., Firestone, E. R., O'Reilly, J. E., Maritorena, S., O'Brien, M. C., Siegel, D. A., ... & Chavez, F. P. (2000). SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series. Volume 11; SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses.

Hu, C., Lee, Z., & Franz, B. (2012). Chlorophyll algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1).

Instituto de Ecología A.C. de México (INECOL), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Nayarit, ficha técnica del Estado.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (1990). Nayarit en Síntesis. Consultado en noviembre 2017 en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bviniegi/productos/historicos/920/702825920173/702825920173_1.pdf

Ji, L., Geng, X., Sun, K., Zhao, Y., & Gong, P. (2015). Target detection method for water mapping using Landsat 8 OLI/TIRS imagery. *Water*, 7(2), 794-817.

Jiménez Estrada, M. Y. (2013). Caracterización de las relaciones bio-ópticas del fitoplancton frente al sistema lagunar Navachiste, Sinaloa, México.

Kalff, J. (2002). *Limnology: inland water ecosystems. Eutrophication: Causes, Consequences and Control*, Vol. 2. (pp. 18).

Karszenbaum Haydee, Barraza Veronica. (2018) Introducción a la teledetección cuantitativa. Interacciones en el óptico: firmas espectrales. PDF recuperado en marzo 2018 desde: <http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000032-25950268dd/5.-Firmas%20espectrales.pdf>

Khan, F. A., Naushin, F., Rehman, F., Masoodi, A., Irfan, M., Hashmi, F., & Ansari, A. A. (2014). Eutrophication: global scenario and local threat to dynamics of aquatic ecosystems. In *Eutrophication: causes, consequences and control* (pp. 17-27). Springer Netherlands.

Khattab, M. F., & Merkel, B. J. (2013). Application of Landsat 5 and Landsat 7 images data for water quality mapping in Mosul Dam Lake, Northern Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(9), 3557-3573.

Kirk, J. T. O. (1984). Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnology and Oceanography*, 29(2), 350-356.

Kruse, F. A. (2004, March). Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO. In *Summaries of 13th JPL Airborne Geoscience Workshop*, Jet Propulsion Lab, Pasadena, CA.

Kutser, T. (2004). Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 49(6), 2179-2189.

Kutser, T., Herlevi, A., Kallio, K., & Arst, H. (2001). A hyperspectral model for interpretation of passive optical remote sensing data from turbid lakes. *Science of the Total Environment*, 268(1), 47-58.

Kutser, T., Metsamaa, L., Strömbeck, N., & Vahtmäe, E. (2006). Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1), 303-312.

Lejarza, J., & Lejarza, I. (2010). Regresión [Internet], Universidad de Valencia. Recuperado en noviembre del 2017 desde: <http://ocw.uv.es/ciencias-sociales-y-juridicas/estadistica/2t5.pdf>

Ma, R., & Dai, J. (2005). Investigation of chlorophyll-a and total suspended matter concentrations using Landsat ETM and field spectral measurement in Taihu Lake, China. *International Journal of Remote Sensing*, 26(13), 2779-2795.

Manrique Reol, Esteban, Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas [en línea]* 2003, XII (enero-abril) : [Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2017] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54012108>> ISSN 1132-6344

Maritorena, S., & O'Reilly, J. E. (2000). OC2v2: Update on the initial operational SeaWiFS chlorophyll a algorithm. O'Reilly, JE, and, 24, 3-8.

Masocha, M., Dube, T., Nhiwatiwa, T., & Choruma, D. (2017). Testing utility of Landsat 8 for remote assessment of water quality in two subtropical African reservoirs with contrasting trophic states. *Geocarto International*, 1-14.

Matthews, R. A. (2016). *Freshwater Algae in Northwest Washington, Volume I, Cyanobacteria*.

Mayo, M., Gitelson, A., Yacobi, Y. Z., & Ben-Avraham, Z. (1995). Chlorophyll distribution in lake kinneret determined from Landsat Thematic Mapper data. *Remote Sensing*, 16(1), 175-182.

Mendiondo, E. M. (2013). Global review of lake and reservoir eutrophication and associated management challenges.

Mobley, C. D. (1994). *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic press.

Nas, B., Ekercin, S., Karabörk, H., Berktaş, A., & Mulla, D. J. (2010). An application of Landsat-5TM image data for water quality mapping in Lake Beyşehir, Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution*, 212(1-4), 183-197.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2015. The Landsat Program (El programa Landsat). Consultado en Enero 2017 en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Siegel, D. A., O'Brien, M. C., Toole, D., Mitchell, B. G., ... & Hooker, S. B. (2000). Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part, 3, 9-23.

OpenStax College, (30 May 2013) Biology. OpenStax College, Rice University. Capítulo 8, p. 225. PDF consultado el 25 de Noviembre, 2017 desde: https://cnx.org/contents/GFy_h8cu@9.87:-CmzvUct@12/The-Light-Dependent-Reactions-

O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., ... & McClain, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11), 24937-24953.

Palmer, S. C., Hunter, P. D., Lankester, T., Hubbard, S., Spyrakos, E., Tyler, A. N., ... & Tóth, V. R. (2015). Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake. *Remote Sensing of Environment*, 157, 158-169.

Pizzolon, L. I. N. O. (1996). Importancia de las cianobacterias como factor de toxicidad en las aguas continentales. *Interciencia*, 21(6), 239-245.

Raisman Jorge S. y Gonzalez Ana María (2000). *Fotosíntesis: etapas*. Universidad Nacional del Nordeste, República Argentina. Recuperado de: <http://www.biologia.edu.ar/>

Ramus, J. (1995). Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. *BioScience*, 45(3), 220-222.

Rantajarvi, E., Olsonen, R., Hällfors, S., Leppänen, J. M., & Raateoja, M. (1998). Effect of sampling frequency on detection of natural variability in phytoplankton: unattended high-frequency measurements on board ferries in the Baltic Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 55(4), 697-704.

Ritchie, J. C., Cooper, C. M., & Schiebe, F. R. (1990). The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sensing of environment*, 33(2), 137-148.

Rohlich, G. A. (1969). *Eutrophication: causes, consequences, correctives*. US National Academy of Sciences, Washington.

Romero C. A., 2016, agosto 08. Apoya la UAN preservación del lago Santa María del Oro. Entrevistador: Karina Gómez. Agencia Informativa Conacyt. Recuperado de: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/8980-apoya-la-uan-preservacion-del-lago-santa-maria-del-oro>

Salas Betancourt A., Yolotzin A. P. & Cepeda M. J. (2016). Tesis de pre-grado: Dinámica de nutrientes del lago Santa María del Oro, Nayarit. Universidad Autónoma de Nayarit.

Schindler, D. W., Hecky, R. E., & McCullough, G. K. (2012). The rapid eutrophication of Lake Winnipeg: Greening under global change. *Journal of Great Lakes Research*, 38, 6-13.

Serrano, D., Filonov, A., & Tereshchenko, I. (2002). Dynamic response to valley breeze circulation in Santa María del Oro, a volcanic lake in Mexico. *Geophysical research letters*, 29(13).

Singh, K., Ghosh, M., Sharma, S. R., & Kumar, P. (2014). Blue-Red-NIR Model for Chlorophyll-a Retrieval in Hypersaline-Alkaline Water Using Landsat ETM+ Sensor. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(8), 3553-3559.

Smith, R. C., & Baker, K. S. (1981). Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm). *Applied optics*, 20(2), 177-184.

Sosa-Nájera, S., Lozano-García, S., Roy, P. D., & Caballero, M. (2010). Registro de sequías históricas en el occidente de México con base en el análisis elemental de sedimentos lacustres:

El caso del lago de Santa María del Oro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 437-451.

Strickland, J. D., & Parsons, T. R. (1972). *A practical handbook of seawater analysis*.

Tenjo Gil Nancy Carolina. (2012) *Estimación de clorofila-a en distintos cuerpos de agua en Colombia y España por técnicas de teledetección*. Universidad de Valencia, Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Valencia España.

Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña, R., & Moreno, J. (2015). Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat 8. *UD y la GEOMÁTICA*, (9).

Tomasini Ortiz, A. C., & Bravo-Inclán, L. A. (2016). *Monitoreo de descargas de aguas residuales y su impacto en el lago de Pátzcuaro, México (2006-2011)*.

Torbick, N., Hession, S., Hagen, S., Wiangwang, N., Becker, B., & Qi, J. (2013). Mapping inland lake water quality across the Lower Peninsula of Michigan using Landsat TM imagery. *International journal of remote sensing*, 34(21), 7607-7624.

Torbick, N., Hu, F., Zhang, J., Qi, J., Zhang, H., & Becker, B. (2008). Mapping chlorophyll-a concentrations in West Lake, China using Landsat 7 ETM+. *Journal of Great Lakes Research*, 34(3), 559-565.

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.

Vincent, R. K., Qin, X., McKay, R. M. L., Miner, J., Czajkowski, K., Savino, J., & Bridgeman, T. (2004). Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 89(3), 381-392.

Vinuesa Pablo (2016). Correlación: teoría y práctica, tema 8. Centro de Ciencias Genómicas, Universidad Autónoma de México (CCG-UNAM). Recuperado en noviembre del 2017 desde: http://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/R4biosciences/docs/Tema8_correlacion.pdf

Watanabe, F. S. Y., Alcântara, E., Rodrigues, T. W. P., Imai, N. N., Barbosa, C. C. F., & Rotta, L. H. D. S. (2015). Estimation of chlorophyll-a concentration and the trophic state of the Barra Bonita hydroelectric reservoir using OLI/Landsat-8 images. *International journal of environmental research and public health*, 12(9), 10391-10417.

Wright, S. W., Jeffrey, S. W., & Mantoura, R. F. C. (Eds.). (2005). *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*. Unesco Pub..

Zhang, L., Zhang, L., & Du, B. (2016). Deep learning for remote sensing data: A technical tutorial on the state of the art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(2), 22-40.

Zhang, Y., Liu, M., Qin, B., Van Der Woerd, H. J., Li, J., & Li, Y. (2009). Modeling remote-sensing reflectance and retrieving chlorophyll-a concentration in extremely turbid case-2 waters (Lake Taihu, China). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), 1937-1948.