

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA
LICENCIATURA EN GEOFÍSICA**



TRABAJO DE GRADUACIÓN

Estimación de índices y parámetros ambientales del agua a partir de imágenes multiespectrales Sentinel en el lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande de El Salvador durante el período 2017-2021

PRESENTADO POR:

Aarón Enrique Estévez Flamenco

PARA OPTAR AL GRADO DE:

Licenciado en Geofísica

ASESORES:

M.Sc. Oscar Armando Amaya

M.Sc. Napoleón Cornejo

Ciudad Universitaria, 3 de diciembre del 2022

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR:

M.Sc. Roger Armando Arias Alvarado

VICERRECTOR ACADÉMICO:

Dr. Raúl Ernesto Azcunaga Lopez

SECRETARIO GENERAL:

Lic. Francisco Alarcón Sandoval

FISCAL GENERAL:

Lic. Rafael Humberto Peña Martín

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

DECANO:

M.Sc. Mauricio Hernán Lovo

VICEDECANO:

M.Sc. Zoila Virginia Guerrero

DIRECTOR INTERINO DE LA ESCUELA DE FÍSICA:

Lic. Guillermo Napoleón Morán

AGRADECIMEINTOS

Primeramente, debo agradecer a Dios por todo el conocimiento y sabiduría concedida para culminar, con este trabajo, la licenciatura en Geofísica. En segundo lugar, agradezco a mis padres, Enrique Estévez y Lidia de Estévez por el constante apoyo que siempre me brindaron en el proceso educativo, la paciencia, el cariño y el respaldo incondicional que me ofrecieron, gracias.

Este trabajo de investigación es el resultado del constante esfuerzo y dedicación realizado durante años del proceso de aprendizaje, que fue posible gracias a todas las personas que estuvieron a mi alrededor, amigos, compañeros, maestros, profesores y docentes. En especial agradecimiento a mis asesores de tesis, los maestros Oscar Amaya y Napoleón Cornejo, quienes me acompañaron, aportaron sus conocimientos y dirigieron la investigación al éxito.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Planteamiento del problema	9
1.2. Objetivos	10
1.2.1. Objetivo general	10
1.2.2. Objetivos específicos.....	10
1.3. Justificación	11
1.4. Antecedentes.....	12
MARCO TEÓRICO	14
2.1. Espectro electromagnético	14
2.2. Teledetección	15
2.2.1. Reflectancia de detección remota.....	15
2.2.2. Resolución de los sensores remotos	17
2.2.3. Imagen satelital	18
2.2.4. Imagen multiespectral.....	19
2.3. Constelación de satélites Sentinel	19
2.3.1. Sentinel-2	19
2.3.2. Sensor MSI.....	20
2.3.3. Sentinel-3	22
2.3.4. Sensor SLSTR.....	23
2.4. Interacción de la radiación electromagnética con la atmosfera	24
2.4.1. Corrección atmosférica.....	25
2.5. Sensado remoto del agua.....	25
2.5.1. Clorofila-a	27
2.5.2. Penetración luminosa	27
2.5.3. Color del agua	28
2.5.4. Materia total suspendida.....	29
2.5.5. Temperatura	29
2.5.6. Índice de vegetación de diferencia normalizada	29
2.5.7. Índice de agua de diferencia normalizada.....	30
2.5.8. Índice de algas flotantes	30
2.5.9. Máscara de agua Sentinel	31
2.6. SNAP.....	31
2.6.1. Procesador C2RCC.....	31

2.7.	Python	31
2.8.	Antecedentes de los sitios de estudio	32
2.8.1.	Resumen de informes del Laboratorio de Toxinas Marinas en Lago de Coatepeque	32
2.8.2.	Resumen de las conclusiones del informe: "Establecimiento de línea base para la identificación de Cianobacterias potencialmente tóxicas del Embalse Cerrón Grande" 34	
METODOLOGÍA		36
3.1.	Zonas de estudio	36
3.1.1.	Embalse Cerrón Grande.....	38
3.1.2.	Lago de Coatepeque	39
3.2.	Datos satelitales	41
3.2.1.	Base de datos satelitales.....	42
3.3.	Registros de datos de los cuerpos de agua	42
3.4.	Procedimiento.....	43
3.4.1.	Preprocesamiento	44
3.4.2.	Extracción de temperatura superficial del agua	44
3.4.3.	Tratamiento de datos para obtener líneas temporales	45
3.4.4.	Operaciones entre bandas espectrales para generación de índices del agua	46
3.4.5.	Estimación de la superficie del espejo de agua y cubierta de algas flotantes	47
3.4.6.	Adquisición del color del agua	48
3.4.7.	Estimación de clorofila-a y materia total suspendida.....	48
3.5.	Evaluación de resultados estimados de imágenes satelitales.....	49
3.5.1.	Correlación de parámetros satelitales con registros de datos	49
3.5.2.	Correlación temporal entre parámetros.....	49
RESULTADOS		50
4.1.	Estimación de índices de agua para el Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande.....	50
4.2.	Estimación de parámetros ambientales del Lago de Coatepeque.....	51
4.2.1.	Espejo de agua.....	51
4.2.2.	Temperatura	52
4.2.3.	Clorofila-a	53
4.2.4.	Materia total suspendida.....	54
4.2.5.	Vegetación flotante	55

4.2.6.	Evolución del color del agua	56
4.3.	Estimación de parámetros satelitales del Embalse Cerrón Grande.....	57
4.3.1.	Espejo de agua.....	57
4.3.2.	Temperatura	58
4.3.3.	Clorofila-a	59
4.3.4.	Materia total suspendida.....	60
4.3.5.	Vegetación flotante	61
4.3.6.	Color.....	62
4.4.	Resultados de correlación de parámetros satelitales con registros de datos	63
4.4.1.	Lago de Coatepeque	63
4.4.2.	Embalse Cerrón Grande.....	66
4.5.	Resultados de correlación temporal entre parámetros satelitales	68
DISCUSION DE RESULTADOS		72
5.1.	Discusión de estimaciones satelitales de parámetros	72
5.1.1.	Discusión de parámetros satelitales en el Lago de Coatepeque.....	72
5.1.2.	Discusión de parámetros satelitales en el Embalse Cerrón Grande.....	77
5.2.	Discusión de estimaciones de parámetros satélites con registros de medidas <i>in situ</i>	84
5.2.1.	Discusión de parámetros satelitales y registros <i>in situ</i> en el Lago de Coatepeque	84
5.2.2.	Discusión de parámetros satelitales y registros <i>in situ</i> en el Embalse Cerrón Grande	86
5.3.	Discusión de correlación temporal entre parámetros satelitales.....	88
5.3.1.	Discusión de correlación temporal entre parámetros satelitales para el Lago de Coatepeque	88
5.3.2.	Discusión de correlación temporal entre parámetros satelitales para el Embalse Cerrón Grande	88
5.4.	Discusión de correlación de comportamientos entre cuerpos de agua.....	89
CONCLUSIONES		90
RECOMENDACIONES.....		91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Longitudes de onda y frecuencias del espectro electromagnético y rango de luz visible, tomado de Young y Freedman (2009).....	14
Figura 2 - Diagrama de sensor pasivo versus sensor activo, tomado de NASA (2021). Créditos al Programa de Entrenamiento de Sensado Remoto Aplicado (ARSET).	15
Figura 3 - (A) Esquema de las irradiancias que contribuye a la reflectancia de detección remota. (B) Esquema de radiancias en interacción con el agua. Créditos a Mobley et al (2020).....	16
Figura 4 - Firma espectral de diferentes componentes de la superficie terrestre y nubes. Créditos a Zhuge et al (2017).	17
Figura 5 - Imagen Landsat 8 del 7 de julio, 2019, sobre Reykjavík, Islandia. Créditos a NASA Earth Observatory.....	18
Figura 6 - Estructura de bandas de imágenes digitales. Créditos a Erdas Field Guide. ...	19
Figura 7 - Configuración orbital de los satélites gemelos Sentinel-2. Créditos a Astrium GmbH.....	20
Figura 8 - Resolución espacial MSI contra longitud de onda: extensión de las 13 bandas espectrales de Sentinel-2, desde el visible y infrarrojo cercano a infrarrojo de onda corta con diferentes resoluciones en tierra de 10 m hasta 60 m. Créditos a ESA.	21
Figura 9 - Ilustración de los componentes del satélite Sentinel-3. Créditos a ESA.....	22
Figura 10 - Esquema de la geometría de visualización del instrumento SLSTR resaltando la franja nadir asimétrica con respecto al punto nadir. Créditos a ESA.	23
Figura 11 - Ventanas atmosféricas en el espectro electromagnético utilizadas en la teledetección para observar la tierra y atmosfera. Créditos a National Weather Service, NOAA.	24
Figura 12 - Efectos típicos de la clorofila y los sedimentos sobre la reflectancia del agua: (a) agua del océano, (b) agua turbia, (c) agua con clorofila. Créditos a Bakker et al (2009)..	26
Figura 13 - Espectro de absorción característico de clorofilas (chl-a, chla-b, chla-c en el espectro visible. Créditos a Fondriest Environmental.....	27
Figura 14 - Penetración luminosa y disco Secchi. Créditos a ERAMUS.....	28
Figura 15 – Color del agua en el lago de Ilopango de El Salvador ante un evento de floración de algas, a partir de imagen satelital de Sentinel-2.....	28
Figura 16 - Mapas de densidad de cianobacterias fitoplanctónicas en el Embalse Cerrón Grande, desde octubre 2018 hasta septiembre del 2019. Creditos Rovira et al 2020.	35
Figura 17 - Mapa de ubicación de zonas de interés, lago de Coatepeque y Embalse Cerrón Grande de El Salvador.....	37
Figura 18 - Mapa de ubicación de la Subcuenca Embalse Cerrón Grande y la Microcuenca Coatepeque, ambas pertenecientes a la Región Hidrográfica Lempa (RHL).	38
Figura 19 - Imágenes del Embalse Cerrón Grande con (A) alta contaminación y (B) con abundante cubierta de jacinto de agua. Créditos a E. Estévez y R. Simán, respectivamente.	39
Figura 20 - Modelo 3D de la microcuenca Coatepeque con exageración vertical, delimitada por el volcán Ilamatepec, cerro verde y la estructura de la caldera de Coatepeque.....	40
Figura 21 - Imágenes del lago de Coatepeque con (A) coloración normal, (B) con cambio de coloración turquesa con bandas de espuma blanca, y (C) presencia de algas.	41
Figura 22 - Diagrama de la metodología empleada en la investigación.	44
Figura 23 - Diagrama de la metodología para extracción de la temperatura superficial del agua.	46

Figura 24 - Geometría espectralmente identificada como agua resultante del cálculo de los índices NDWI, NDVI y SWM.	50
Figura 25 - Grafica temporal de la superficie del espejo de agua (km ²) del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	51
Figura 26 - Grafica temporal y línea de tendencia de temperatura (°C) del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	52
Figura 27 - Grafica del comportamiento de clorofila-a (mg/m ³) en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	53
Figura 28 - Grafica de la concentración de materia total suspendida (g/m ³) en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	54
Figura 29 - Grafica temporal del porcentaje acumulado de cantidad de algas flotantes en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	55
Figura 30 - Secuencia del color mensual en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	56
Figura 31 - Grafica temporal de la superficie del espejo de agua (km ²) del embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.	57
Figura 32 - Grafica temporal y línea de tendencia de temperatura (°C) del embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.	58
Figura 33 - Grafica del comportamiento de clorofila-a (mg/m ³) en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.	59
Figura 34 - Grafica de la concentración de materia total suspendida (g/m ³) en el embalse Cerrón Grande (2017-2021).	60
Figura 35 - Grafica temporal y línea de tendencia de temperatura (°C) del embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.	61
Figura 36 - Secuencia del color mensual en el embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.	63
Figura 37 - Gráfica de correlación entre temperatura satelital y registro de temperatura medida in situ en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	64
Figura 38 - Gráfica de correlación entre clorofila-a satelital y registro de profundidad de disco Secchi medida in situ en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	64
Figura 39 - Gráfica de correlación entre clorofila-a satelital y registro de conductividad eléctrica medida in situ en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	65
Figura 40 - Gráfica de correlación entre materia total suspendida satelital y registro de profundidad de disco Secchi medida in situ en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	65
Figura 41 - Gráfica de correlación entre materia total suspendida satelital y registro de conductividad eléctrica medida in situ en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	65
Figura 42 - Gráfica de correlación entre temperatura satelital y registro de temperatura medida in situ en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).	66
Figura 43 - Gráfica de correlación entre clorofila-a satelital y registros medidos in situ en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).	66
Figura 44 - Gráfica de correlación entre clorofila-a y registros de profundidad del disco Secchi en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).	67
Figura 45 - Gráfica de correlación entre clorofila-a y registros de conductividad eléctrica en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).	67
Figura 46 - Gráfica de correlación entre la materia total suspendida y registros de profundidad del disco Secchi en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).	67

Figura 47 - Gráfica de correlación entre la materia total suspendida y registros de conductividad eléctrica en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).....	68
Figura 48 - Consolidado de gráficas resultado de estimaciones satelitales en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.....	69
Figura 49 - Consolidado de gráficas resultado de estimaciones satelitales en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.....	70
Figura 50 - Resúmenes de fechas anómalas de parámetros satelitales del agua de LC y ECG, periodo 2017-2021.....	71
Figura 51 - Gráfica de valores de superficie, líneas de tendencia y patrón de superficie del espejo de agua en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	72
Figura 52 - Piezometría y dirección de flujo subterráneo en el Lago de Coatepeque. Fuente: Sistema de Información Hídrica, MARN.....	73
Figura 53 - Gráfica de valores de temperatura superficial (°C) y líneas de tendencia en el agua del Lago de Coatepeque (2017-2021).....	74
Figura 54 - Gráfica de columnas de promedios mensuales de concentración de clorofila-a (chl-a) en el lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.....	76
Figura 55 - Gráfica de columnas de promedios mensuales de concentración de materia total suspendida (TSM) en el lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.....	77
Figura 56 - Gráfica de valores de superficie y líneas de tendencia de agua en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).....	78
Figura 57 - Piezometría y dirección de flujo subterráneo en el Embalse Cerrón Grande. Fuente: Sistema de Información Hídrica (SIHI), MARN.....	79
Figura 58 - Gráfica de valores de temperatura superficial (°C) y líneas de tendencia en el agua del embalse Cerrón Grande (2017-2021).....	80
Figura 59 - Gráfica de columnas de promedios mensuales de concentración de clorofila-a (chl-a) en el embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.....	82
Figura 60 - Gráfica de columnas de promedios mensuales de concentración de materia total suspendida (TSM) en el embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.....	83
Figura 61 – Gráfica de valores y tendencias de temperatura satelital y registros in situ en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	84
Figura 62 - Gráfica de correlación entre materia total suspendida satelital y registro de profundidad de disco Secchi en escala logarítmica en el Lago de Coatepeque (2017-2021).	85
Figura 63 - Tendencia y correlación entre temperatura satelitales e in situ en el embalse Cerrón Grande (2018-2019).....	86
Figura 64 - Correlación y líneas de tendencia entre clorofila-a in situ y satelital (2018-2019).	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Estudios de teledetección aplicado al agua.....	12
Tabla 2 - Resolución radiométrica y características de MSI de Sentinel-2.	21
Tabla 3 - Resolución radiométrica y características de SLSTR de Sentinel-3.	23
Tabla 4 - Resumen de informes LABTOX-UES en el Lago de Coatepeque (2017-2021). 32	
Tabla 5 - Imágenes satelitales Sentinel-2 y Sentinel-3 adquiridas, periodo 2017-2021....	42
Tabla 6 – Registros de mediciones in situ en el periodo 2017-2021 en lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande.	43
Tabla 7 – Coordenadas para extracción de datos LST.	45
Tabla 8 - Tabla de expresiones matemáticas de índices de agua.....	46
Tabla 9 - Imágenes satelitales Sentinel-2 y Sentinel-3 adquiridas, periodo 2017-2021....	49
Tabla 10 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la superficie (km ²) del espejo de agua del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	52
Tabla 11 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la línea de tendencia de temperatura (°C) en la superficie del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	53
Tabla 12 - Resumen de eventos de concentraciones anómalas de clorofila-a (mg/m ³) en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	54
Tabla 13 - Resumen de eventos de concentraciones anómalas de materia total suspendida (g/m ³) en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	55
Tabla 14 - Resumen de valores altos y bajos de índice de algas flotantes en la superficie del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	56
Tabla 15 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la superficie (km ²) del espejo de agua del embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.	58
Tabla 16 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la línea de tendencia de temperatura (°C) en la superficie del Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021. 59	
Tabla 17 - Resumen de eventos de concentraciones anómalas de clorofila-a (mg/m ³) en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.....	60
Tabla 18 - Resumen de eventos de concentraciones anómalas de materia total suspendida (g/m ³) en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.....	61
Tabla 19 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la línea de tendencia de temperatura (°C) en la superficie del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.	62
Tabla 20 - Reducción de la superficie del espejo de agua en el Lago de Coatepeque a partir de valores máximos y mínimos.....	74
Tabla 21 - Incremento de la temperatura de la superficie del agua en el Lago de Coatepeque a partir de los valores mínimos	75
Tabla 22 – Comportamiento de superficies máximas y mínimas en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021)	78
Tabla 23 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la línea de tendencia de temperatura (°C) en la superficie del Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021. 81	

INTRODUCCIÓN

Los ojos, probablemente los órganos más sensibles, pueden sentir solo una pequeña porción del espectro electromagnético, el visual, pero el cerebro puede interpretar esta información de muchas maneras, proporcionando información de composición, forma, orientación, o perspectiva (Clark y Rilee, 2010). Sin embargo, la visión natural humana presenta limitantes (alcance, espectro visible, perspectiva), que únicamente pueden superadas con el uso de instrumentos ópticos que potencien nuestras capacidades, como cámaras, telescopios y sensores multiespectrales. Estos precisos instrumentos mejorar la capacidad de entendimiento del medio natural que nos rodea.

El sensado remoto es un método que utiliza vehículos aéreos y satélites para transportar sensores ópticos que registran señales (natural o artificial) del espectro electromagnético provenientes de la superficie terrestre de forma remota. Los instrumentos son diseñados con objetivos específicos, características y sensibilidad a fenómenos puntuales, por ejemplo, mediciones ambientales. Los satélites sensan continuamente la superficie terrestre generando información del color del agua en tierra y el océano, útil para realizar monitoreo ambiental en cuerpos de agua dulce.

En la superficie terrestre existen almacenamientos de agua naturales (lagos y lagunas) y artificiales (embalses) con características físicas, químicas y biológicas. Los ecosistemas son receptivos y dinámicos, susceptibles a factores climáticos, estacionales, aporte de constituyentes de ríos y escorrentías, actividades antropogénicas, entre otros. Los cuerpos de agua pueden llegar a sufrir cambios en su coloración producto de componentes mayoritarios disueltos o en suspensión, como algas, materia orgánica disuelta, sedimentos y nutrientes.

El Salvador posee múltiples cuerpos de agua terrestres, entre estos se destacan el Lago de Coatepeque por su atractivo turístico, y el Embalse Cerrón Grande por su importancia como humedal y fuente de generación hidroeléctrica. A pesar de su relevancia, existe insuficiente de investigación científica como para comprender los acontecimientos que suceden a lo largo del tiempo; conocimientos necesarios para promover el cuidado y conservación de los ecosistemas.

La investigación tiene como objetivo la estimación de índices (NDWI, NDVI, SWM, FAI) y parámetros ambientales (temperatura, clorofila-a, materia total suspendida, vegetación flotante y superficie del espejo de agua) en el Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande a partir de imágenes multiespectrales de los satélites Sentinel-2 y Sentinel-3, del programa Copernicus, de la Unión Europea (UE), que permitan monitorear de forma periódica el estado de los cuerpos de agua y complementar los esfuerzos de investigaciones con métodos *in situ*.

1.1. Planteamiento del problema

Tradicionalmente, el monitoreo y evaluación de la calidad del agua se ha basado en las mediciones *in situ*, recolección de muestras y análisis de laboratorio para medir indicadores relacionados con las propiedades física, químicas y biológicas del cuerpo de agua (Peterson *et al*, 2020). Estas operaciones conllevan numerosas complicaciones operativas, la logística y coordinación necesaria para cada jornada de recolección de muestras dificulta la ejecución de proyectos, por ejemplo, permisos ambientales, coordinación con guarda recursos, transporte, embarcación, disponibilidad de personal capacitado, seguridad ocupacional, etc. Adicionalmente, es fundamental la operatividad y calibración de equipos e instrumentos para garantizar las mediciones.

Las campañas de recolección de muestras *in situ* se realizan en zonas puntuales de forma representativa para la totalidad del cuerpo de agua, discretizando ampliamente la dinámica espacial de los fenómenos. Consecuentemente, los resultados pueden no presentar la realidad y dinámica en el agua. Sin embargo, las mediciones *in situ* proveen datos y resultados precisos, con la desventaja de generar información en amplios intervalos de tiempo, mensualmente en el mejor de los casos, o de manera esporádica.

El sensado remoto y el uso de las tecnologías espaciales logra ser un complemento ideal de la investigación *in situ* gracias a la periodicidad de recolección de datos, la amplia cobertura y gran resolución de medición. Este método permite superar los vacíos de información entre mediciones e incluso brindar continuidad al trabajo de campo, además, posibilita el estudio de eventos pasados. Por tanto, la combinación de mediciones *in situ* y sensado remoto, puede constituir una forma eficaz de realizar monitoreo, ya que garantiza la continuidad y permanencia de las investigaciones en los cuerpos de agua.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estimar y analizar índices (NDWI, NDVI, SWM, FAI) y parámetros ambientales (color, temperatura, clorofila-a, materia total suspendida, vegetación flotante y superficie del espejo de agua) del agua en el Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande de El Salvador a partir de imágenes multiespectrales Sentinel en el período 2017-2021.

1.2.2. Objetivos específicos

- a. Estimar índices (NDWI, NDVI, FAI, SWM) y parámetros ambientales (color, temperatura, clorofila-a, materia total suspendida, vegetación flotante y superficie del espejo de agua) del agua en el lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande de El Salvador a partir de imágenes multiespectrales.
- b. Utilizar registros de parámetros físicos, químicos y biológicos medidos *in situ* para evaluar los productos estimados de las imágenes satelitales.
- c. Utilizar registros de imágenes multiespectrales de los satélites Sentinel-2 y Sentinel-3 como recurso para el estudio del Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande de El Salvador durante el periodo 2017-2021.
- d. Analizar y describir la magnitud y distribución espaciotemporal de los índices y parámetros estimados en el Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande.

1.3. Justificación

Los ecosistemas acuáticos generalmente han sido estudiados a partir de mediciones *in situ* de las propiedades físicas, químicas y biológicas, con datos puntuales en espacio y tiempo, cuya discretización torna dificultoso el análisis de los fenómenos que ocurren en los cuerpos de agua. El trabajo de campo puede presentar impedimentos inesperados, repercutiendo en el intervalo de fechas de muestreo y ausencia de datos en sectores la zona de estudio, por tanto, generando un registro irregular en los datos.

Estas adversidades pueden ser superadas con el uso de la teledetección como herramienta de apoyo para el monitoreo continuo de cuerpos de agua. Este notable método que utiliza la luz solar reflejada por la superficie terrestre y agua para la adquisición de datos, permitiendo generar datos periódicos a buena resolución. El método utiliza sensores satelitales que miden rangos espectrales específicos (bandas espectrales) de la luz solar para la caracterización e identificación de componentes perceptibles en la superficie del agua.

Por tanto, este trabajo pretende hacer uso de las tecnologías espaciales de sensado remoto para desarrollar e implementar una metodología de monitoreo de índices y parámetros ambientales en los cuerpos de agua terrestres de El Salvador. Así, dar respuesta a la falta de información, brindar continuidad a las investigaciones, proveer datos en ecosistemas poco estudiados y fortalecer los trabajos *in situ*. La teledetección es un método que es preciso, rentable, con mediciones frecuentes y actualizadas, con amplio campo de visión (cientos de metros), y con creciente desarrollo. La investigación se procura la conservación de los ecosistemas y promover el buen uso del agua de los lagos, lagunas y embalses de El Salvador.

1.4. Antecedentes

La historia de la teledetección comienza con la fotografía. El origen de otros tipos de teledetección se remonta a la Segunda Guerra Mundial, con el desarrollo de sistemas de detección de radar, sonar e infrarrojos térmicos. Desde la década de 1960, los sensores se han diseñado para operar en prácticamente todo el espectro electromagnético. En la actualidad, se dispone de una amplia variedad de instrumentos de teledetección para su uso en estudios hidrológicos (Moore, 1979). En diferentes partes del mundo fueron conformadas agencias espaciales con fines científicos, exploratorios y de observación. La Agencia Espacial Europea (ESA) fue establecida el 30 de mayo de 1975 (ESA, s.f.) como un convenio de la Unión Europea.

ESA ha desarrollado y ejecutado el programa Copernicus, con el objetivo de monitorear y predecir el estado del ambiente en tierra, océano y atmósfera para mitigación del cambio climático, entre otras. Copernicus es atendido por satélites (las familias Copernicus Sentinel) y un conjunto de Misiones Contribuyentes adicionales (satélites administrados por varias agencias comerciales y nacionales). Desde el lanzamiento de Sentinel-1A en 2014, la Unión Europea puso en marcha un proceso para poner en órbita una constelación de casi 20 satélites más antes de 2030 (Copernicus, s.f.). Cada misión de Sentinel se basa en una constelación de dos satélites para cumplir con los requisitos de revisión y cobertura terrestre. Las misiones en el espectro visible e infrarrojo con aplicaciones en agua son los satélites Sentinel-2 y Sentinel-3.

Sentinel-2 (S2) es una misión de imágenes de alta resolución multiespectral (sensor MSI) de órbita polar para el monitoreo de la tierra, que proporciona imágenes de la vegetación, la cubierta del suelo y el agua, las vías navegables interiores y las áreas costeras. Sentinel-2A se lanzó el 23 de junio de 2015 y Sentinel-2B el 7 de marzo de 2017. Sentinel-3 (S3) es una misión de múltiples instrumentos (OLCI, SLSTR, entre otros) para medir la topografía de la superficie del mar, la temperatura de la superficie del mar y la tierra, el color del océano y el color de la tierra con precisión y confiabilidad de alta gama. Sentinel-3A se lanzó el 16 de febrero de 2016 y Sentinel-3B el 25 de abril de 2018 (European Space Agency [ESA], s.f.-a).

Múltiples científicos (tabla 1) han desarrollado ampliamente la técnica del sensado remoto en agua continental, obteniendo resultados consistentes en diferentes latitudes y regiones. Utilizando la radiancia de la superficie del agua en el espectro visible, infrarrojo cercano (NIR) y térmico (TIR) han logrado estimar parámetros en el agua, por ejemplo, la temperatura, turbidez, oxígeno disuelto (OD), conductividad, pH, sólidos totales disueltos (TDS), profundidad disco Secchi (SDD), clorofila-a (Chl-a). También, han realizado relaciones matemáticas entre bandas de imágenes de satélite (índices) para estudiar fenómenos asociados al agua y tierra; ejemplos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 - Estudios de teledetección aplicado al agua.

Autor	Parámetro	Sensor	Satélite
Lyu <i>et al</i> (2020)	Chl-a	OLCI	S3
Bresciani <i>et al</i> (2019)	Chl-a, turbidez, SDD, temperatura	MSI	S2
Delegido <i>et al</i> (2019)	Turbidez, SSD	MSI	S2

Dogliotti <i>et al</i> (2018)	Chl-a, índice FAI	MSI, OLI, Aqua	S2, Landsat-8, MODIS
Du, Y. <i>et al</i> (2016)	Índices NDWI, MNDWI	MSI	S2
García, R. <i>et al</i> (2013)	Índices NDVI, FAI	No descrito	MODIS
Delegido <i>et al</i> (2011)	Índices NDVI, LAI	MSI	S2
Gitelson, A. <i>et al</i> (2008)	Chl-a	No descrito	MERIS, MODIS

Nota: Las investigaciones de los autores mencionados han sido utilizados como ejemplos para el desarrollo de esta investigación.

Actualmente en El Salvador, son pocas las instituciones con objetivos de investigaciones científicas de carácter ambiental, en las que se puede mencionar a las universidades e instituciones estatales. La Universidad de El Salvador (UES) destaca a través del Laboratorio de Toxinas Marinas (LABTOX-UES) como ente referente en la investigación de cuerpos de agua dulce y marino, con registros de parámetros físicos, químicos y biológicos en Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande; similarmente, la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA) realiza importantes investigaciones de carácter ambiental. Estas investigaciones pueden ser complementadas con el uso de datos satelitales.

En el país, la teledetección ha sido un recurso poco utilizado, en menor medida con aplicaciones en cuerpos de agua como ríos y lagos. Sin embargo, García, C., Henríquez, D. y Moz, G. (2013) utilizaron medidas *in situ* de parámetros fisicoquímicos e imágenes satelitales Landsat-7 para realizar una simulación hidrodinámica en el Embalse Cerrón Grande; adicionalmente, se realizó el establecimiento de línea base para la identificación de Cianobacterias potencialmente tóxicas del Embalse Cerrón Grande por Rovira, M. *et al* (2020).

MARCO TEÓRICO

2.1. Espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas cubren un espectro extremadamente amplio de longitudes de onda y frecuencia. Este espectro electromagnético incluye las ondas de radio y televisión, la luz visible, la radiación infrarroja y ultravioleta, los rayos X y gamma. A pesar de las muchas diferencias en su uso y medios de producción, todas ellas son ondas electromagnéticas con la misma rapidez de propagación (en el vacío), $c=299,792,458$ m/s. Las ondas electromagnéticas difieren en frecuencia f y longitud de onda λ , pero la relación $c = \lambda f$ en el vacío se cumple para cada una (Young y Freedman, 2009).

El visible (VIS) es una pequeña región del espectro electromagnético que apenas abarca desde los 0.4 μm hasta los 0.7 μm . El color azul iría desde 0.4 hasta 0.5 μm , el verde desde 0.5 μm hasta 0.6 μm y el rojo de 0.6 μm a 0.7 μm . La energía ultravioleta (UV) se encuentra inmediatamente por debajo del color azul. Por encima del rojo se sitúa la región infrarroja (IR), que a su vez está dividida en tres categorías: IR próximo (NIR) (0.7 – 1.3 μm), IR medio (SWIR) (1.3 – 3 μm) e IR térmico (TIR) (3– 100 μm). La porción de microondas se encuentra más allá del IR, a longitudes de onda mucho más grandes, que son las longitudes de onda más largas usadas en teledetección (Labrador *et al*, 2012).

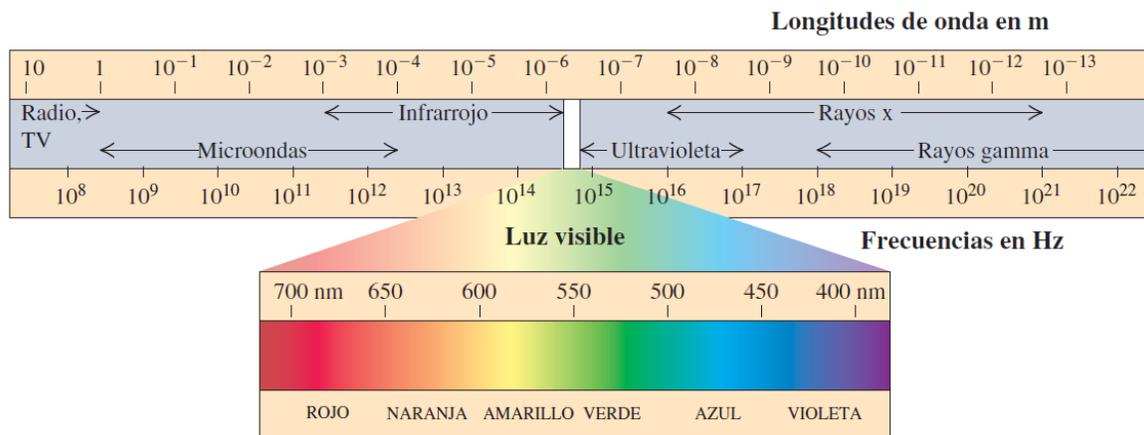


Figura 1 - Longitudes de onda y frecuencias del espectro electromagnético y rango de luz visible, tomado de Young y Freedman (2009).

Cualquier onda puede considerarse compuesto por cierto número de ondas sinusoidales o componentes espectrales, cada uno llevando una parte del flujo radiante del total de la onda. La banda espectral sobre la cual se extiende cada uno de estos diferentes componentes se llama anchura espectral o ancho de banda de la onda componente. La forma en la que los anteriores términos radiométricos se distribuyen entre los componentes de diferentes longitudes de onda o frecuencias se llama distribución espectral. Todas las cantidades o términos radiométricos tienen su término espectral equivalente que corresponde a una determinada longitud de onda o frecuencia (Ormeño, 2006).

2.2. Teledetección

La teledetección es un tipo de tecnología geoespacial que mide la radiación electromagnética (EM) emitida y reflejada por los ecosistemas terrestres, atmosféricos y acuáticos para detectar y monitorear las características físicas de un área sin hacer contacto físico. Este método de recopilación de datos generalmente involucra tecnologías con sensores en aeronaves y en satélites, que son clasificados como sensores pasivos o sensores activos (OmniSci, 2021).

Los sensores pasivos responden a estímulos externos, estos registran la energía natural que se refleja o emite desde la superficie de la Tierra. La fuente de radiación más común detectada por sensores pasivos es la luz solar reflejada. Por el contrario, los sensores activos utilizan estímulos internos para recopilar datos sobre la Tierra. Por ejemplo, un sistema de detección remota por rayo láser proyecta un láser sobre la superficie de la Tierra y mide el tiempo que tarda el láser en reflejarse en su sensor (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2021).

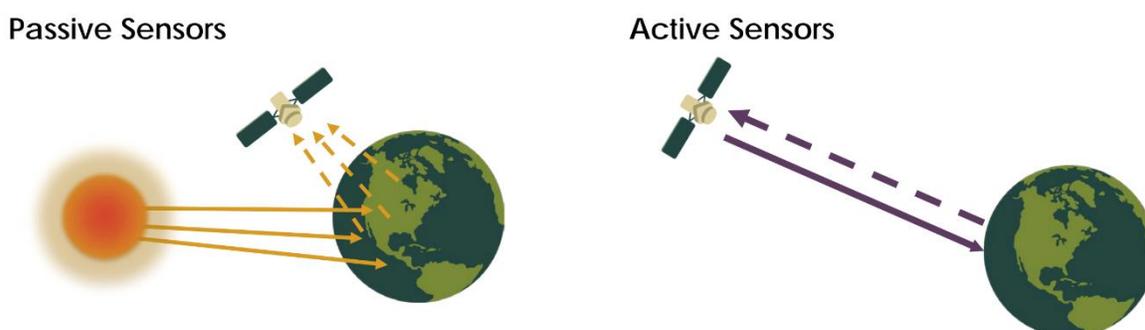


Figura 2 - Diagrama de sensor pasivo versus sensor activo, tomado de NASA (2021). Créditos al Programa de Entrenamiento de Sensado Remoto Aplicado (ARSET).

Para que un sensor sea capaz de registrar una señal procedente del fondo del agua, dicha señal debe recorrer un camino largo y complejo. El flujo de fotones descendente procedente del sol debe interactuar en primer lugar con la atmósfera, atravesar la interfaz aire-agua y finalmente interactuar con la columna de agua. Además, una vez el flujo de fotones ha interactuado dentro del agua, es necesario que éste realice el camino inverso como una señal lo suficientemente intensa como para ser registrada por el sensor (Casal, 2013). Una suposición remarcable en el sensado remoto es que los objetivos de interés tienen características energéticas únicas, identificables sobre la base de una suficiente resolución espectral (dependiente de la naturaleza de la señal) y resolución espacial (dependiente del tamaño y la naturaleza de la variación del objetivo) (Clark y Rilee, 2010).

2.2.1. Reflectancia de detección remota

La reflectancia obtenida mediante sensado remoto es ampliamente en la interpretación del color del océano, por la facilidad de realizar mediciones radiométricas de planos de irradiancia ascendentes y descendentes (Mobley *et al*, 2020). La reflectancia es la proporción de energía incidente que es reflejada por una superficie. Es una magnitud adimensional que puede tomar valores entre 0 y 1, o porcentajes entre 0% y 100%. Para una determinada superficie este parámetro varía en función de la longitud de onda (Labrador *et al*, 2012). La reflectancia de detección remota es definida como:

$$R_{rs}(\theta, \phi, \lambda) = \frac{L_w(\theta, \phi, \lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (1)$$

Donde, θ y ϕ especifican la dirección polar y azimutal, respectivamente, en un sistema coordinado de conveniencia, y λ es la longitud de onda. $L_w(\theta, \phi, \lambda)$ es la radiancia espectral saliente del agua en dirección (θ, ϕ) . $E_d(\lambda)$ es la irradiancia del plano espectral descendente incidente sobre la superficie del mar (Mobley,1999).

La radiancia saliente del agua (L_w) se refiere a la luz que entro al cuerpo de agua desde el cielo, siendo dispersado en direcciones ascendentes dentro del agua, y después transmitida a través de la superficie del agua de regreso al cielo. La reflectancia de detección remota (R_{rs}) es, como se observa en la figura 3A, una medida de la cantidad de radiancia descendente que incide sobre la superficie del agua en cualquier dirección (medida por un sensor de irradiación plana) que eventualmente regresa a través de la superficie en un pequeño ángulo sólido $\Delta\Omega$ centrada en una dirección particular (θ, ϕ) (Mobley *et al*, 2020).

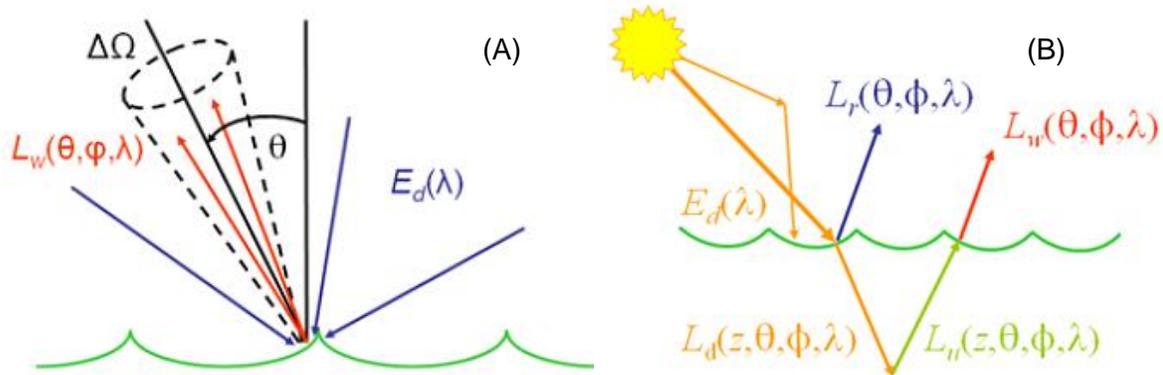


Figura 3 - (A) Esquema de las irradiancias que contribuye a la reflectancia de detección remota. (B) Esquema de radiancias en interacción con el agua. Créditos a Mobley *et al* (2020).

El radiómetro es un dispositivo que se utiliza para medir la intensidad de la energía radiante; en dirección a la superficie del agua mide la suma (L_t) de la radiancia proveniente del agua (L_w) más cualquier radiancia adicional que ha sido reflejada (L_r) por la superficie del océano en dirección (θ, ϕ) , ver ecuación 2. Donde, L_r es una fracción de la radiancia solar que incide (L_s) y es reflejada por la superficie del agua. La radiancia saliente del agua (L_w) es producto de cualquier radiancia con dirección ascendente por debajo de la superficie del agua (L_u) (Mobley,1999).

$$L_t(\theta, \phi) = L_r(\theta, \phi) + L_w(\theta, \phi) \quad (2)$$

Al gráfico de la reflectancia espectral frente a la longitud de onda se le denomina curva de reflectancia o firma espectrales. La configuración de estas curvas permite extraer las características espectrales de una superficie y tiene una gran influencia sobre la elección de la región espectral en la cual los datos de teledetección se deben adquirir para una aplicación particular (Labrador *et al*, 2012).

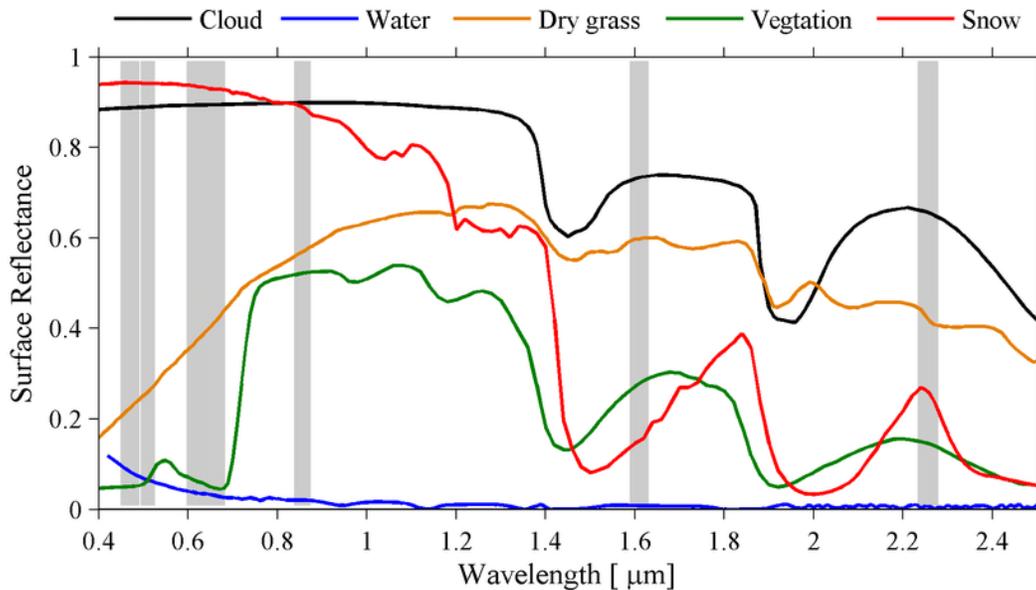


Figura 4 - Firma espectral de diferentes componentes de la superficie terrestre y nubes. Créditos a Zhuge *et al* (2017).

En comparación con la vegetación y los suelos, el agua tiene una reflectancia más baja. La vegetación puede reflejar hasta un 50%, los suelos hasta un 30–40%, mientras que el agua refleja como máximo el 10% de la energía incidente. El agua refleja la energía electromagnética en el rango visible y un poco en el rango NIR. Más allá de 1,2 μm se absorbe toda la energía (Bakker *et al*, 2009). Como el agua casi no se refleja en la gama cercana al infrarrojo, se distingue muy bien de otras superficies. Estas superficies acuáticas aparecerán claramente delimitadas como áreas oscuras (valores de píxel bajos) en imágenes registradas en la gama cercana al infrarrojo (European Space Agency [ESA], 2014).

2.2.2. Resolución de los sensores remotos

Los sensores instalados en los satélites de teledetección poseen una serie de particularidades que determinan las características de las imágenes que van a proporcionar. Estas características vienen definidas básicamente por diferentes tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica, temporal (Labrador *et al*, 2012).

La resolución espacial es una medida de la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie de la Tierra, y viene representada por un píxel. Un píxel es la unidad mínima que conforma una imagen digital. Cuanto mayor sea la resolución espacial, más pequeños serán los objetos que se pueden distinguir en la superficie y viceversa (Labrador *et al*, 2012). Las geometrías del sistema de medición son bastante diferentes, dependiendo de la naturaleza del plan de la misión, así mismo, dependiendo del objeto de estudio y su composición (sólido, líquido, gas o plasma) (Clark y Rilee, 2010)

La resolución radiométrica es la cantidad de información en cada píxel, es decir, el número de bits que representan la energía registrada. Cada bit registra un exponente de potencia 2. Por ejemplo, una resolución de 8 bits es 28, lo que indica que el sensor tiene 256 valores digitales potenciales (0-255) para almacenar información. Por lo tanto, cuanto mayor es la

resolución radiométrica, más valores están disponibles para almacenar información, lo que proporciona una mejor discriminación incluso entre las más mínimas diferencias de energía (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2021).



Figura 5 - Imagen Landsat 8 del 7 de julio, 2019, sobre Reykjavík, Islandia. Créditos a NASA Earth Observatory.

La resolución espectral es la capacidad de un sensor para discernir longitudes de onda más finas, es decir, tener más bandas y más estrechas. Muchos sensores se consideran multispectrales, lo que significa que tienen entre 3 y 10 bandas. Los sensores que tienen cientos o incluso miles de bandas se consideran hiperespectrales. Cuanto más estrecha sea la gama de longitudes de onda para una banda determinada, más fina será la resolución espectral (NASA, 2021).

La resolución temporal es el intervalo de tiempo entre dos vuelos idénticos sobre la misma área, también llamado tasa de repetición o revisita. La resolución temporal está determinada por la altitud y la órbita del satélite, así como por las características de su sensor (ángulo de visión) (Scottish Earth Observation Service, s.f.).

2.2.3. Imagen satelital

El tipo de producto más común que suministran los satélites de teledetección es una imagen digital tipo raster, donde cada píxel tiene asignado uno o varios valores numéricos (niveles digitales) que hacen referencia a la energía media recibida dentro de una determinada banda espectral (Labrador *et al*, 2012).

Es importante tener presente su naturaleza discreta y espectral, el valor de la imagen de salida en cualquier punto (x,y) viene dado por la suma ponderada de la señal de entrada, la radiancia de la escena, en la vecindad de (x,y) . Desde un punto de vista matemático, una imagen monocroma es una función bidimensional de las coordenadas espaciales x e y , dada por $f(x,y)$ donde z representa la luminancia de la imagen en el punto (x,y) . Siendo, z univaluada positiva y normalizada ($0 \leq z \leq 1$), correspondiendo los valores extremos al negro y blanco respectivamente (Ormeño, 2006).

2.2.4. Imagen multiespectral

Una imagen multiespectral consta de varias bandas de datos. Para la presentación visual, cada banda de la imagen puede mostrarse una banda a la vez como una imagen de escala de grises, o en combinación de tres bandas a la vez como una imagen compuesta de color. La interpretación de una imagen compuesta de color multiespectral requerirá el conocimiento de la firma de reflectancia espectral de los objetivos en la escena (Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing, 2001). Por ejemplo, el satélite Sentinel-2 utiliza el Instrumento Multiespectral (MSI) que adquiere 13 bandas espectrales que van desde el visible y el infrarrojo cercano (VNIR) hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR) a lo largo de una franja orbital de 290 km.

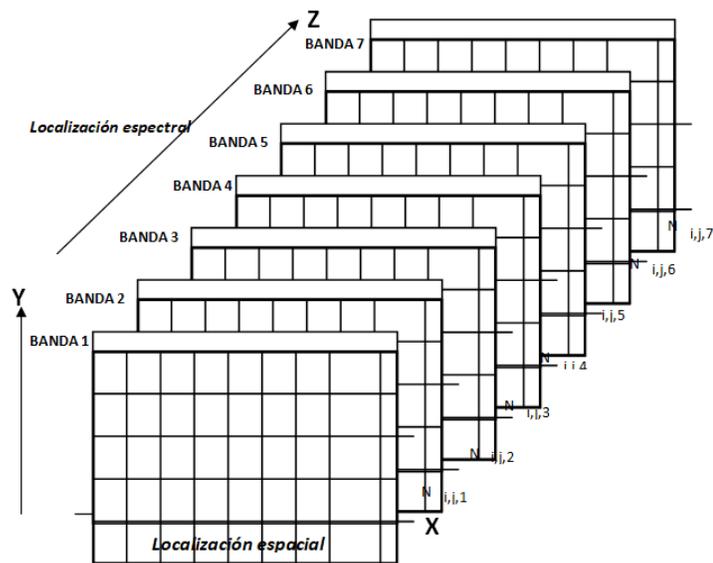


Figura 6 - Estructura de bandas de imágenes digitales. Créditos a Erdas Field Guide.

2.3. Constelación de satélites Sentinel

La Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) desarrollo una nueva generación de misiones de observación de la Tierra en cooperación conjunta con la Comisión Europea Copernicus. El objetivo del programa Sentinel es reemplazar las misiones de observación de la Tierra más antiguas, que se han retirado, como las misiones ERS y Envisat, o que actualmente se acercan al final de su vida útil operativa. Esto garantiza la continuidad de los datos para que no existan lagunas en los estudios en curso. Cada misión se centra en un aspecto diferente de la observación de la Tierra; monitoreo atmosférico, oceánico y terrestres y los datos son utilizados en múltiples aplicaciones (ESA, 2021a).

2.3.1. Sentinel-2

La misión Copernicus Sentinel-2 (S2) comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica con el sol, en fase a 180° entre sí, a una altitud media de 786 km. Su objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre, su amplio ancho de franja (290 km) y su alto tiempo de revisita (5 días con los 2 satélites en condiciones sin nubes) garantiza el monitoreo de los cambios

en la superficie de la Tierra. Es una misión de imágenes de alta resolución multispectral para el monitoreo de la Tierra proveyendo, por ejemplo, imágenes de la vegetación, la cubierta del suelo y el agua, aguas continentales y las áreas costeras. Sentinel-2A se lanzó el 23 de junio de 2015 y Sentinel-2B siguió el 7 de marzo de 2017 (ESA, 2021b).

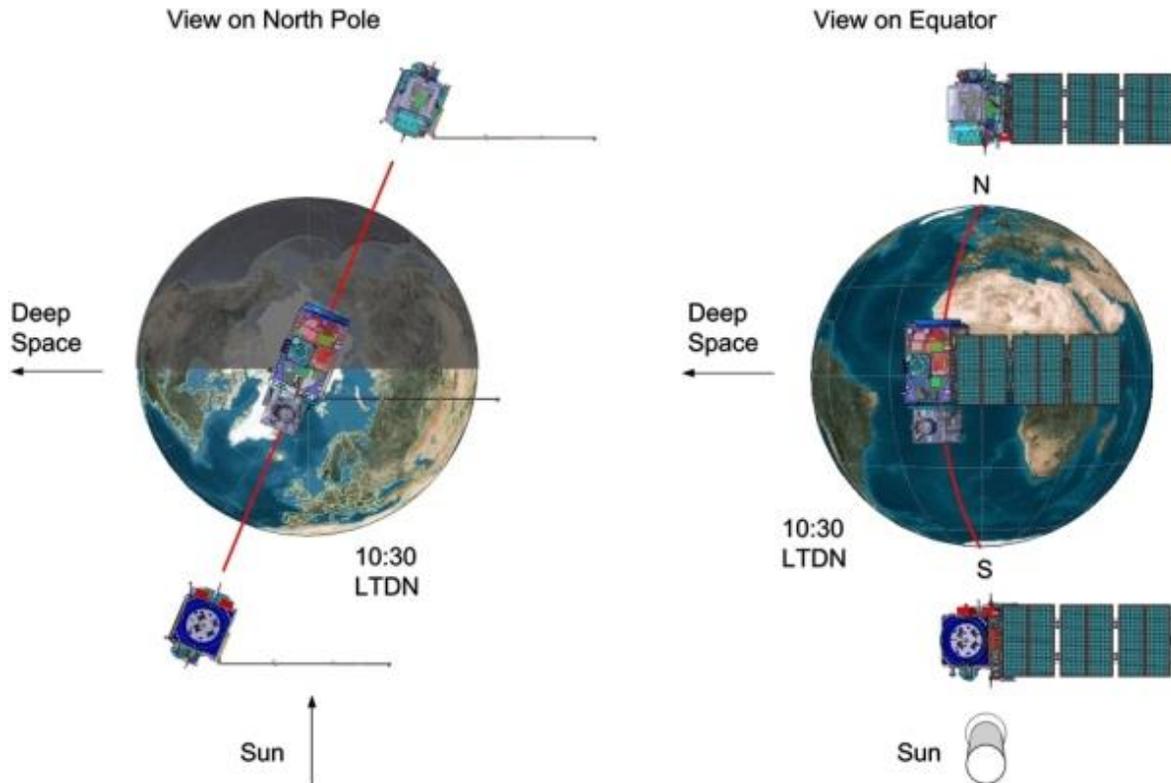


Figura 7 - Configuración orbital de los satélites gemelos Sentinel-2. Créditos a Astrium GmbH.

2.3.2. Sensor MSI

El satélite S2 lleva consigo el Instrumento Multiespectral (MSI, por sus siglas en inglés), con objetivo medir la radiación reflejada de la tierra a través de la atmósfera en 13 bandas espectrales, abarcando el rango visible, infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), conformados por (ESA, 2021c):

- 4 bandas de resolución de 10 m: azul (490nm), verde (560nm), rojo (665nm) e infrarrojo cercano (842nm).
- 6 bandas de resolución de 20 m: 4 bandas estrechas para la caracterización de la vegetación (705 nm, 740 nm, 783 nm y 865 nm) y 2 bandas SWIR más grandes (1610 nm y 2190 nm) para aplicaciones como la detección de nieve / hielo / nubes o la evaluación del estrés hídrico de la vegetación.
- 3 bandas de resolución de 60 m, principalmente para detección de nubes y correcciones atmosféricas (443 nm para aerosoles, 945 para vapor de agua y 1375 nm para detección de cirros).

Tabla 2 - Resolución radiométrica y características de MSI de Sentinel-2.

Numero de banda	S2A		S2B		Resolución espacial (m)
	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	
1	442.7	21	442.3	21	60
2	492.4	66	492.1	66	10
3	559.8	36	559.0	36	10
4	664.6	31	665.0	31	10
5	704.1	15	703.8	16	20
6	740.5	15	739.1	15	20
7	782.8	20	779.7	20	20
8	832.8	106	833.0	106	10
8a	864.7	21	864.0	22	20
9	945.1	20	943.2	21	60
10	1373.5	31	1376.9	30	60
11	1613.7	91	1610.4	94	20
12		175	2185.7	185	20

Nota. Guía de usuario del Sentinel-2 MSI, resolución radiométrica. ESA (2021c).

El instrumento multispectral (MSI) utiliza un concepto de barrido de empuje. Un sensor de barrido funciona recopilando filas de datos de imágenes a lo largo de la franja orbital y utiliza el movimiento de avance de la nave espacial a lo largo de la trayectoria de la órbita para proporcionar nuevas filas para la adquisición. El período promedio de observación sobre áreas terrestres y costeras es de aproximadamente 17 minutos y el período máximo de observación es de 32 minutos (ESA, 2021c).

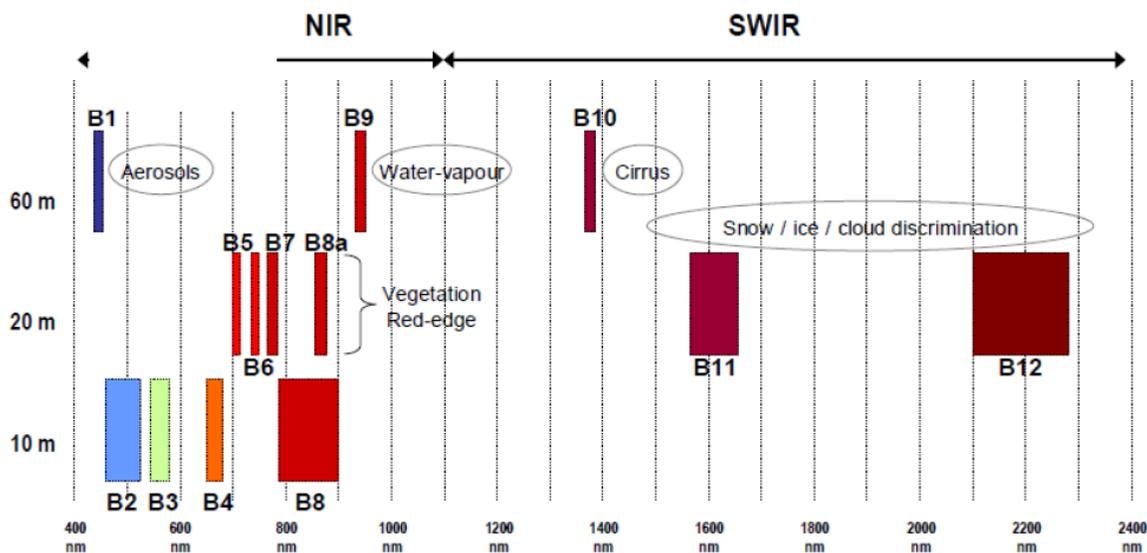


Figura 8 - Resolución espacial MSI contra longitud de onda: extensión de las 13 bandas espectrales de Sentinel-2, desde el visible y infrarrojo cercano a infrarrojo de onda corta con diferentes resoluciones en tierra de 10 m hasta 60 m. Créditos a ESA.

2.3.3. Sentinel-3

El satélite Sentinel-3 es una misión satelital europea de observación de la Tierra desarrollada para apoyar las aplicaciones oceánicas, terrestres, atmosféricas, de emergencia, de seguridad y criosféricas. La misión incluye una pareja de satélites, Sentinel-3A (S3A) y Sentinel-3B (S3B), el primero fue lanzado el 16 de febrero del 2016 y el segundo el 25 de abril del 2018. La órbita de S3B es idéntica a la de S3A pero vuela a +/- 140° fuera de fase con S3A; la órbita es casi polar, sincrónica con el sol, a una altitud media de 814.5 km. Los dos satélites Sentinel-3 en órbita permiten un breve tiempo de revisita (con ambos satélites) de 1.9 días para el sensor OLCI y 0.9 días para SLSTR en el ecuador; el instrumento OLCI tiene una superposición del 100% con la franja del instrumento SLSTR. Su vida útil es de 7 años, aunque transporta suministro para 12 años (ESA, 2021d).

La nave espacial lleva cuatro instrumentos principales:

- OLCI: Instrumento de color oceánico y terrestre
- SLSTR: Instrumento de temperatura superficial del mar y la tierra
- SRAL: Altimetro de radar SAR
- MWR: Radiómetro de microondas.

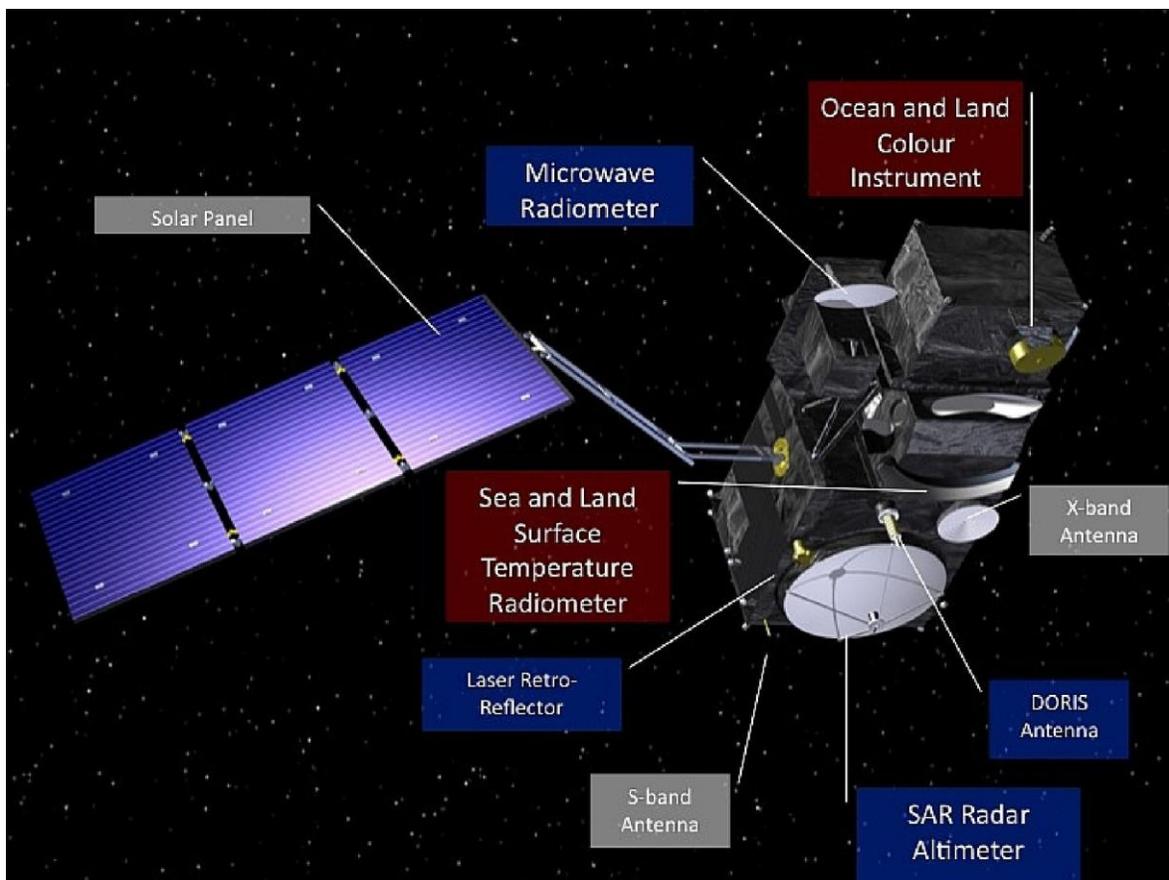


Figura 9 - Ilustración de los componentes del satélite Sentinel-3. Créditos a ESA.

2.3.4. Sensor SLSTR

El Radiómetro de Temperatura de la Superficie del Mar y Tierra (SLSTR, por sus siglas en inglés) es un radiómetro de escaneo a doble-vista de la temperatura, que vuela en la órbita baja terrestre. Actualmente existen dos instrumentos en órbita, a bordo de los satélites Sentinel-3A y Sentinel-3B. El objetivo principal de los productos SLSTR es de proporcionar la temperatura de la superficie del mar (SST) y la tierra (LST) a nivel mundial y regional con un nivel de precisión muy alto (mejor que 0.3 K para SST) tanto para aplicaciones climatológicas como meteorológicas. También proporciona información sobre la recuperación de aerosoles y el poder radiativo del fuego (ESA, 2021f).

El sensor utiliza dos series de escáneres independientes, cada uno incluye un espejo de escaneo separado; esta configuración aumenta espacialmente la cobertura de la franja del instrumento. La franja de vista oblicua es de 740 km; la franja de vista del nadir es de 1400 km siendo asimétrica con respecto al punto nadir para proveer una cobertura idéntica y contemporánea con las mediciones del instrumento OLCI. (ESA, 2021g). Los productos de SLSTR (mediciones nivel-1B y nivel-2) se generan por separado para las dos vistas de los instrumentos (nadir y oblicua) a una resolución espacial que depende del canal utilizado (ESA, 2021f).

- Resolución de 500 m para bandas de reflectancia solar (S1-S6). Acceso restringido.
- Resolución de 1 km para bandas de infrarrojos térmicos (S7-S9 y F1-F2). Acceso libre.

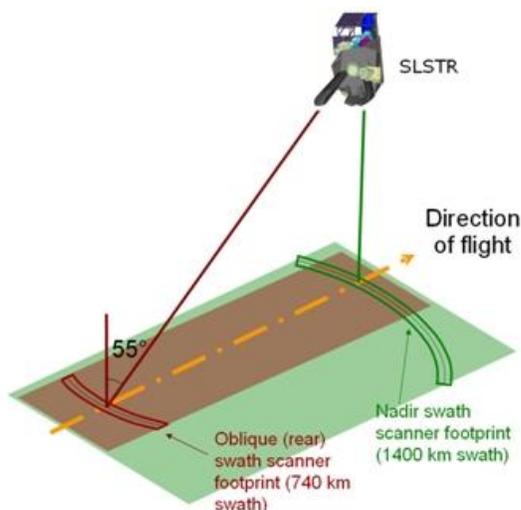


Figura 10 - Esquema de la geometría de visualización del instrumento SLSTR resaltando la franja nadir asimétrica con respecto al punto nadir. Créditos a ESA.

Tabla 3 - Resolución radiométrica y características de SLSTR de Sentinel-3.

Banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Función
S1	554.27	19.26	Ventana de nubes, monitoreo de vegetación, aerosoles
S2	659.47	19.25	NDVI, monitoreo de vegetación, aerosoles
S3	868.00	20.60	NDVI, marcado de nube, corrección de pixel

S4	1374.80	20.80	Detección de cirrus sobre tierra
S5	1613.40	60.68	Limpieza de ruido, hielo, nieve, monitoreo de vegetación
S6	2255.70	50.15	Estado de la vegetación y limpieza de nubes
S7	3742.00	398.00	SST, LST, fuego activo
S8	10854.00	776.00	SST, LST, fuego activo
S9	12022.50	905.00	SST, LST
F1	3742.00	398.00	Fuego activo
F2	10854.00	776.00	Fuego activo

Nota. Guía de usuario del Sentinel-3 SLSTR, resolución radiométrica. ESA (2021f). Resolución 1Km.

2.4. Interacción de la radiación electromagnética con la atmosfera

La presencia de una atmósfera con gases afecta todos los aspectos del proceso de transmisión de energía, incluida la velocidad, frecuencia, intensidad, dirección y distribución espectral de la energía. Las atmósferas dispersan, absorben y refractan la luz. La radiación es dispersada en todas direcciones por partículas atmosféricas. El tipo de dispersión depende de la relación entre el tamaño de la partícula y la longitud de onda, la forma más común ocurre cuando el diámetro de las partículas está en la escala de las longitudes de onda. Los principales agentes de dispersión de la luz visible son el vapor de agua y las partículas de polvo (Clark, y Rilee, 2010).

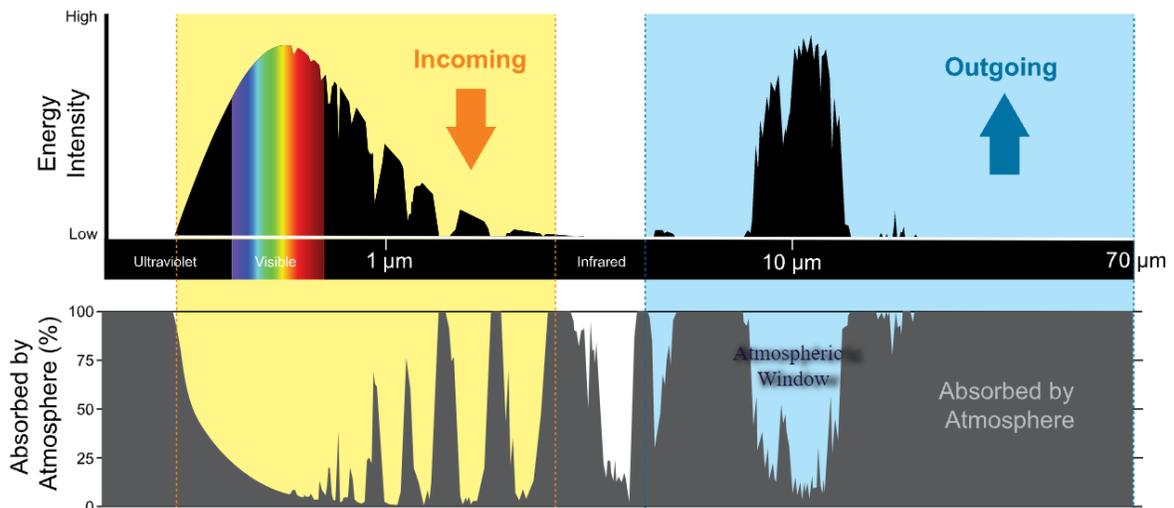


Figura 11 - Ventanas atmosféricas en el espectro electromagnético utilizadas en la teledetección para observar la tierra y atmosfera. Créditos a National Weather Service, NOAA.

Las longitudes de onda donde la mayoría de la radiación puede atravesar se llaman "ventanas atmosféricas". Afortunadamente, puede pasar una gran cantidad de luz visible (caso contrario, la luz del día nunca llegaría a la superficie terrestre). La atmósfera también es casi un 100% translúcida para ciertas gamas del espectro cercano al infrarrojo, lo que posibilita la observación por satélite con un mínimo de distorsión atmosférica. La gama térmica infrarroja (10-12 μm) se usa para medir las temperaturas superficiales del suelo, el agua y las nubes. Incluso si la teledetección se realiza en ventanas atmosféricas, ésta se ve interferida hasta cierto punto por la difusión y la absorción de la atmósfera. Por eso, la

teledetección a menudo queda ligeramente distorsionada y debe ajustarse mediante una posterior manipulación digital de la imagen (ESA, 2014a).

2.4.1. Corrección atmosférica

Con la corrección atmosférica se pretende eliminar el efecto de dispersión de la atmósfera sobre la señal electromagnética registrada por los sensores, para obtener lo más certeramente posible las características de la superficie observada. La dispersión es una de las principales causas de bruma, lo que genera una disminución del contraste de la imagen. Esta corrección es indispensable para determinados estudios donde se obtienen firmas espectrales de las cubiertas o parámetros biofísicos a partir de las imágenes. En estos casos, habrá que transformar primero los niveles digitales a valores de radiancia (significado físico) y después a valores de reflectividad del tope de la atmósfera (Copernicus, 2018).

Las imágenes de satélite a veces parecen borrosas o con niebla, ya que la atmósfera absorbe y dispersa la luz en su camino hacia el suelo. La dispersión y absorción que provoca la atmósfera en la radiación que alcanza el sensor reducen el número de nivel digital en las imágenes, especialmente en las longitudes de onda más cortas. A efectos visuales esto se traduciría en una pérdida de contraste (Labrador *et al*, 2012). La reflectancia de las nubes difiere mucho más de la de los otros tipos de superficies en superficies de alta reflectancia (cerca de 1) que en superficies de baja reflectancia (cerca de cero) (Zhuge *et al*, 2017).

El primer paso es la detección y el filtrado de nubes y sombras de nubes; esto dará como resultado el marcado de píxeles contaminados (contaminados directamente, como ocultos por las nubes o cubiertos por sus sombras, o indirectamente como cerca de las nubes e impactados por efectos de adyacencia y dispersión múltiple). El segundo paso consiste en eliminar los píxeles destellados, esto se hace principalmente analizando la banda SWIR (ESA, 2019). Para eliminar la dispersión, se utilizan los principios básicos de la física y conociendo las condiciones meteorológicas (Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab, 2021).

2.5. Sensado remoto del agua

La relación entre el comportamiento espectral del agua y la presencia de Componentes Ópticamente Activos (OAC, por sus siglas en inglés) hace que la teledetección y el procesamiento de imágenes digitales sean herramientas valiosas para monitorear la calidad del agua. El hecho de que el agua tenga una firma espectral muy distintiva, caracterizada principalmente por su fuerte absorción en el infrarrojo de onda corta y cercana, hace que sea fácilmente detectable utilizando estas longitudes de onda (Teodoro, 2016).

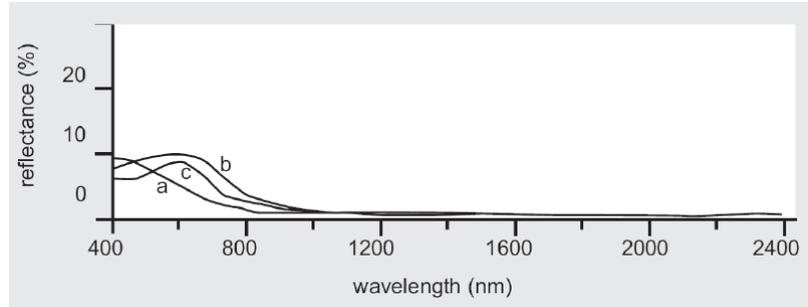


Figura 12 - Efectos típicos de la clorofila y los sedimentos sobre la reflectancia del agua: (a) agua del océano, (b) agua turbia, (c) agua con clorofila. Créditos a Bakker *et al* (2009).

El agua se mezcla con componentes que pueden permanecer en solución o suspensión un largo periodo de tiempo. Mediante técnicas de teledetección es posible la observación de los OAC, ya que interaccionan con la radiación electromagnética incidente (Radin *et al*, 2020). Diferentes tipos de curvas de reflectancia espectral del agua se muestran en la figura 13. El agua turbia (cargada de limo) logra la mayor reflectancia. Las algas presentes en agua presentan un pico de reflectancia pronunciado para la luz verde debido a la clorofila (Bakker *et al*, 2009).

La detección remota de las concentraciones de los constituyentes del agua se basa en la relación entre la reflectancia de la detección remota (ver ecuación 1), y las propiedades ópticas inherentes, es decir, los coeficientes de absorción total (a) y retrodispersión (b_b).

$$R_{rs}(\lambda) \propto \gamma \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (3)$$

Donde λ es la longitud de onda (nm) y γ es dependiente de la geometría del campo de luz emergente desde el cuerpo de agua. $a(\lambda)$ es la suma de los coeficientes de absorción de pigmentos de fitoplancton (a_{pigm}), materia orgánica disuelta coloreada (a_{CDOM}), triptón ($a_{tripton}$, partículas no algales) y agua pura (a_{water}):

$$a = a_{pigm} + a_{CDOM} + a_{tripton} + a_{water} \quad (4)$$

En aguas turbias (continentales) las regiones espectrales verde y azul no se pueden usar directamente, por ejemplo, para recuperar clorofila-a, debido a las absorciones superpuestas, no correlacionadas y mucho más grandes de materia orgánica disuelta y triptón (Gordon & Morel, 1983, como se citó en Gitelson *et al*, 2008). Por lo que, se han desarrollado una variedad de algoritmos para recuperar los componentes ópticamente activos en aguas turbias, como clorofila-a y materia total suspendida. Modelos de reflectancia de tres bandas (Dall'Olmo *et al*, 2003; Gitelson *et al*, 2008) han sido desarrollados para ser sensitivos a las concentraciones de estos elementos. También han sido desarrolladas redes neuronales entrenadas para obtener mejores resultados de las concentraciones de las variables, como el procesador C2RCC desarrollado por Brockmann (2016).

$$\text{Concentración de pigmento} = [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3) \quad (5)$$

2.5.1. Clorofila-a

La clorofila-a (chl-a) obtenida mediante información satelital es una estimación de la concentración del pigmento de fitoplancton en la superficie del océano y se utiliza como una aproximación de la cantidad de fitoplancton en el agua superficial. Esta medición tiene muchas aplicaciones en la ecología marina, desde el modelado de ecosistemas hasta la gestión de pesquerías y el monitoreo de la calidad del agua, por nombrar solo algunas aplicaciones (NOAA, 2021a).

Similarmente, en lagos y embalses, los organismos encargados de realizar la fotosíntesis transformando la radiación en energía química son los llamados fotoautótrofos, de los cuales destaca el fitoplancton, responsable en gran medida del color aparente del agua. Una de las principales variables de calidad del agua estudiadas mediante teledetección es la clorofila-a (Chl-a), un pigmento de color verde del fitoplancton donde reside principalmente el proceso de fotosíntesis (Ruiz *et al.*, 2003).

La Chl-a, aunque refleja principalmente en la región del verde, absorbe la mayor parte de la energía de las longitudes de onda de la luz azul, violeta y naranja-roja (Naciones Unidas, s.f.). Las clorofilas, presentes en todas las células de fitoplancton, causarán 2 picos dominantes en los espectros de absorción, el primario en azul (440 nm) y el pico secundario en la parte roja de los espectros (675 nm). La presencia de otros pigmentos (según la especie y los taxones) provocará la ampliación del pico azul y la aparición de máximos de absorción adicionales (Mobley *et al.*, 2020).

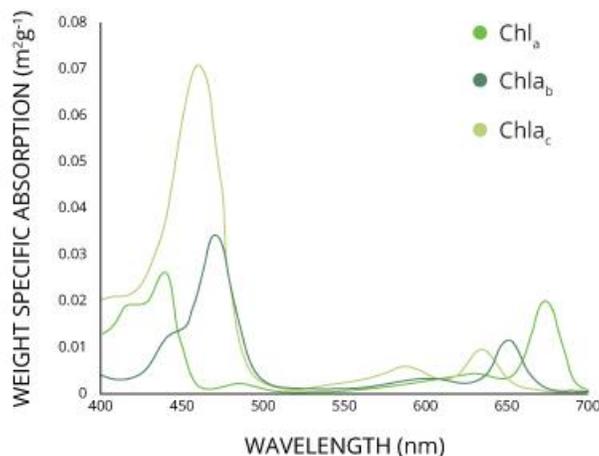


Figura 13 - Espectro de absorción característico de clorofilas (chl-a, chl-a-b, chl-a-c en el espectro visible. Créditos a Fondriest Environmental.

2.5.2. Penetración luminosa

La claridad del agua es la primera propiedad percibida por los usuarios que está relacionada con dos variables que han sido muy estudiadas por la teledetección desde sus inicios: la transparencia y la turbidez del agua (Matthews, 2011). La transparencia puede ser estimada a través de la profundidad de visión del disco de Secchi en m (SD), que se define como la profundidad a la que el ojo humano deja de ver un disco metálico de 20 cm de diámetro, y que es un buen indicador de la profundidad a la que la luz del sol penetra en el agua (Lee *et al.*, 2016).

Las mismas propiedades ópticas del agua que influyen en la atenuación de la luz en la columna de agua (y, por lo tanto, en las mediciones de transparencia *in situ*) también determinan la reflectancia espectral de regreso al satélite, como la turbidez debida a los sedimentos en suspensión, la coloración marrón resultante de los compuestos orgánicos disueltos y la clorofila. y otros pigmentos utilizados por el fitoplancton para cosechar luz para la fotosíntesis (Rubin *et al*, 2021).

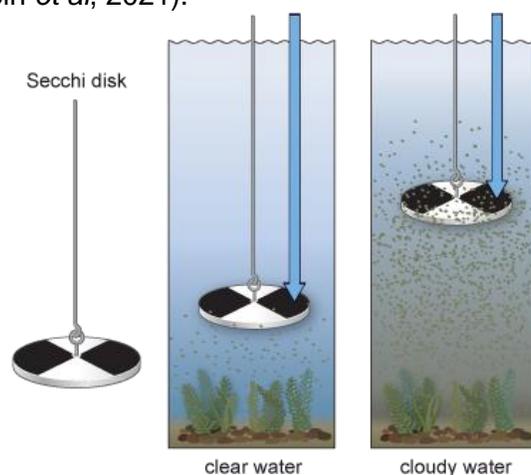


Figura 14 - Penetración luminosa y disco Secchi. Créditos a ERAMUS.

2.5.3. Color del agua

El azul del agua proviene de las moléculas de agua que absorben el extremo rojo del espectro de luz visible. El color en el agua que ves a tu alrededor se puede impartir de dos maneras: componentes disueltos y suspendidos. Un ejemplo de sustancias disueltas es el tanino, que es causado por materia orgánica proveniente de hojas, raíces y restos de plantas (imagen inferior izquierda). El agua altamente coloreada tiene efectos significativos sobre las plantas acuáticas y el crecimiento de algas. La luz es muy crítica para el crecimiento de las plantas acuáticas y el agua coloreada puede limitar la penetración de la luz. Por lo tanto, un cuerpo de agua muy coloreado no podría sostener la vida acuática, lo que podría conducir al deterioro a largo plazo del ecosistema (USGS, 2018).



Figura 15 – Color del agua en el lago de Ilopango de El Salvador ante un evento de floración de algas, a partir de imagen satelital de Sentinel-2.

2.5.4. Materia total suspendida

La materia suspendida total derivada de satélites (TSM) es una medida de la concentración de material particulado en el agua superficial, como lodo, limo y otros desechos en escala fina, incluidas fracciones orgánicas e inorgánicas (NOAA, 2021b).

La TSM está formada por todas las partículas en suspensión por unidad de volumen de agua, formadas a partir de la descomposición de la materia orgánica disuelta, de los minerales que han sido arrastrados a causa de la escorrentía superficial del agua, de la resuspensión de los minerales del fondo y por el plancton. Esta variable es un buen indicador en el control de calidad de aguas debido a su relación directa con la transparencia o turbidez de los ecosistemas acuáticos (Matthews, 2011).

2.5.5. Temperatura

Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética como resultado del movimiento térmico de sus moléculas; esta radiación, llamada radiación térmica, es una mezcla de diferentes longitudes de onda (Ormeño, 2006). La temperatura es un parámetro importante para los procesos físicos y bioquímicos que ocurren dentro del agua, así como en las interacciones aire-agua porque regula los procesos físicos, químicos y biológicos en el agua (Naciones Unidas, s.f.).

Las mediciones a partir de sensores remotos de la temperatura del agua se pueden obtener con un sensor que detecta la radiación térmica (bandas de ondas de 3–5 y 8–14 μm) emitidas desde los 0,1 mm superiores de la superficie del agua (Naciones Unidas, s.f.). Algunos sensores satelitales que operan en las bandas de infrarrojos térmicos (TIR) proporcionando mediciones de la temperatura del agua superficial de los lagos (LSWT) que, además de indicar el estado del agua, es de gran importancia para monitorear las consecuencias del cambio climático y estudiar la climatología. ciclos (Layden *et al*, 2015).

2.5.6. Índice de vegetación de diferencia normalizada

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un simple, pero efectivo índice para cuantificar la vegetación verde. Normaliza la dispersión de las hojas verdes en longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR) con la absorción de clorofila en longitudes de onda rojas (RED). El rango de valores del NDVI es de -1 a 1. Los valores negativos de NDVI (valores cercanos a -1) corresponden al agua. Los valores cercanos a cero (-0,1 a 0,1) generalmente corresponden a áreas áridas de roca, arena o nieve. Los valores bajos y positivos representan arbustos y pastizales (aproximadamente de 0,2 a 0,4), mientras que los valores altos indican selvas tropicales y templadas (valores cercanos a 1). Es un buen indicador de la vegetación verde viva (Sentinel-Hub, s.f.). De acuerdo a Garcia, R. *et al* (2013), el NDVI permite identificar especies que muestren un "borde rojo" en su espectro de reflectancia sobre el agua.

El NDVI generalmente se define como una relación de la diferencia entre la radiación (o reflectancia) de la parte superior de la atmósfera (TOA) en las longitudes de onda del rojo y el infrarrojo cercano (NIR) dividida por su suma.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6)$$

2.5.7. Índice de agua de diferencia normalizada

El índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), propuesto por McFeeters (1996), utiliza la banda verde (GREEN) e infrarrojo cercano (NIR) de imágenes de teledetección basadas en el fenómeno de que el cuerpo de agua tiene una fuerte capacidad de absorción y baja radiación en el rango desde el visible hasta las longitudes de onda infrarrojas.

El Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) se utiliza para monitorear cambios sutiles del contenido de agua en los cuerpos de agua. (Sentinel-Hub, s.f.-a). De acuerdo al Sistema de Observación de la Tierra (EOS, s.f.) las longitudes de onda verdes visibles (GREEN) maximizan la reflectancia típica de la superficie del agua. Las longitudes de onda del infrarrojo cercano maximizan la alta reflectancia de la vegetación terrestre y las características del suelo, al tiempo que minimizan la baja reflectancia de las características del agua.

Autores como Du, Y. *et al* (2016) han aprovechado los resultados del NDWI para el mapeo de cuerpos de agua debido a su sensibilidad ante tierra, zonas construidas y el agua.

El índice NDWI se describe como:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (7)$$

El resultado de la ecuación NDWI son valores positivos de 0.2 a 1 para la superficie del agua, 0 a 0.2 en zonas inundadas y húmedas, -0.3 a 0 corresponden a sequias moderadas y superficies no acuosas, y -1 a -0.3 para zonas secas (EOS, s.f.).

2.5.8. Índice de algas flotantes

La detección de macroalgas flotantes mediante teledetección se ha realizado habitualmente mediante índices que aprovechan su fuerte señal en el infrarrojo cercano (NIR) y en el infrarrojo de onda corta (SWIR), que es similar a la de la vegetación terrestre y contrasta mucho con la señal baja procedente del agua (Dogliotti, 2018). Las algas flotantes en la superficie del agua tienen una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) que otras longitudes de onda y, por lo tanto, se pueden distinguir fácilmente de las aguas cristalinas circundantes. Múltiples estudios han utilizado Índice de Algas Flotantes (FAI) para mapear algas flotantes en diferentes ambientes acuáticos (lacustres y oceánicos). FAI es capaz de discriminar entre algas y píxeles de agua (Siddiqui, 2019).

Este índice, es una medida de la altura del pico NIR en relación con un valor de referencia que se interpola linealmente a partir de bandas adyacentes en la longitud de onda roja e infrarroja de onda corta (SWIR) (García, R. *et al*, 2013). El índice FAI se describe en la ecuación 8 y 9, donde λ es la longitud de onda central de las bandas de reflectancia.

$$FAI = NIR - NIR' \quad (8)$$

$$NIR' = RED + (SWIR - RED) \times \left[\frac{\lambda(NIR) - \lambda(RED)}{\lambda(SWIR) - \lambda(RED)} \right] \quad (9)$$

2.5.9. Máscara de agua Sentinel

De acuerdo con Milczarek, M., Robak, A. y Gadawska, A. (2016) la máscara de agua Sentinel (SWM) es un índice que no requiere corrección atmosférica para la identificación de agua desarrollado para las bandas espectrales del Sentinel-2, consistiendo una relación entre la diferencia de la banda azul con la verde, entre la sumatoria del infrarrojo cercano y de onda corta.

$$SWM = \frac{BLUE - GREEN}{NIR + SWIR} \quad (10)$$

2.6. SNAP

La Plataforma de Aplicaciones Sentinel (SNAP) es software con una arquitectura común para todas las herramientas Sentinel, es ideal para el procesamiento y análisis de la observación de la Tierra. Fue desarrollada conjuntamente por Brockmann Consult, SkyWatch y C-S (ESA, s.f.-a).

Las diferentes cajas de herramientas implementadas para SNAP no solo permiten abrir, visualizar y exportar datos satelitales, sino que también permiten al usuario aplicar diferentes niveles de procesamiento, desde simples pasos de preprocesamiento de datos hasta cadenas de procesamiento bastante avanzadas que se pueden configurar a través de la herramienta Graph Builder. SNAP no se limita a los datos de los satélites Copernicus, sino que puede manejar una variedad de datos, tanto de otros satélites EO como de formatos de datos raster y datos de vectores. La funcionalidad SNAP se puede ampliar mediante complementos, que se pueden explorar e instalar a través de la interfaz de usuario. Usuarios avanzados pueden desarrollar sus propios complementos (Citizen Science Earth Observation Lab, s.f.).

2.6.1. Procesador C2RCC

El procesador Case 2 Regional CoastColour (C2RCC) es un procesador de color oceánico multimisión, aplicable a MERIS, OLCI, MODIS, SeaWiFS, Sentinel-2 y Sentinel-3. Se basa en una gran base de datos de simulaciones de transferencia radiativa, invertidas por redes neuronales. El núcleo es un modelo de propiedades ópticas inherentes (IOP) de 5 componentes que se derivó de las mediciones *in situ* de NOMAD. Se han entrenado redes neuronales especiales para rangos extremos de IOP. C2RCC ha sido validado para los diferentes sensores, con buenos resultados para el Caso 2 de agua (Brockmann, 2016). Entre los diferentes métodos desarrollados se encuentra la redes-C2RCC utilizado para aguas con menos turbidez como las marinas, mientras que la redes-C2X (Case-2 Extreme Cases) se emplea en aguas más turbias como las continentales, cuya presencia de sólidos y fitoplancton es más alta (Kyryliuk y Kratzer, 2019).

2.7. Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel interpretado, orientado a objetos y con semántica dinámica. Sus estructuras de datos integradas de alto nivel, combinadas con la escritura y el enlace dinámicos, lo hacen muy atractivo para el desarrollo rápido de aplicaciones, así como para su uso como lenguaje de secuencias de comandos o pegamento para conectar componentes existentes entre sí. El intérprete de Python y la

extensa biblioteca estándar están disponibles en formato fuente o binario sin cargo para todas las plataformas principales y se pueden distribuir gratuitamente (Python Software Foundation, 2022).

2.8. Antecedentes de los sitios de estudio

2.8.1. Resumen de informes del Laboratorio de Toxinas Marinas en Lago de Coatepeque

El Laboratorio de Toxinas Marinas (LABTOX-UES) de la Universidad de El Salvador realiza programas de monitoreo en cuerpos de agua continentales, particularmente han realizado múltiples muestreos de parámetros físicos, químicos y biológicos en el Lago de Coatepeque, principalmente ante eventos de floración de algas y cambios de coloración turquesa. Desde el 2017 hasta 2021 generaron 16 informes y series temporales de temperatura, conductividad eléctrica, profundidad del disco Secchi, pH e información sobre el fitoplancton; la tabla 5 presenta un resumen de eventos ocurridos en el lago.

Tabla 4 - Resumen de informes LABTOX-UES en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

Fecha visita (No. Informe)	Resumen de informes LABTOX-UES	Características principales
31/03/2017 (INF-17-02)	Presencia de filamentos y colonias macroscópicas de cianobacterias <i>Lyngbya sp.</i> y <i>Microcystis cf. aeruginosa</i> flotando en la superficie del agua generando una capa de color verde en superficie. No se identificaron macroalgas o plantas acuáticas flotando. No representan amenaza para el uso recreativo y de consumo del lago.	Colonias y filamentos flotantes de color verde en superficie
24/04/2017 (INF-17-04)	Se observaron colonias y filamentos flotantes de color verde (<i>Lyngbya sp.</i> y <i>Microcystis cf. Aeruginosa</i>), con tendencia a acumularse en superficie. La concentración celular de <i>Microcystis cf. aeruginosa</i> representa un nivel de riesgo moderado para el uso del agua del lago.	Colonias y filamentos flotantes de color verde en superficie
05/05/2017 (INF-17-05)	No se observó presencia de filamentos y/o colonias macroscópicas de cianobacterias flotando en el agua. Tampoco se identificaron parches de color turquesa. Concentraciones celulares calificadas como riesgo bajo o nulo en aguas recreacionales	Normal
28/08/2017 (INF-17-07)	Se observó coloración “turquesa” en todo el cuerpo de agua, no se identificaron acumulaciones densas de cianobacterias ni presencia de espuma. Concentraciones celulares de las cianobacterias de riesgo bajo o nulo, no son la causa del cambio de coloración “turquesa”. Se observan estructuras cristalinas encontradas en el agua.	Coloración turquesa

15/05/2018 (INF-18-03)	Se observaron numerosos filamentos que brindaban una coloración verde-pardo al agua formando una masa macroscópica filamentososa (<i>Lyngbya</i>) y constituyen una proliferación algal nociva clasificada de riesgo alto para bañistas.	Abundantes filamentos verde-pardo
22/05/2018 (INF-18-04)	Se observaron numerosos filamentos (<i>Lyngbya</i>) en la superficie, con una mayor abundancia en el sector suroeste del Lago en las cercanías de la Isla Teopán. La proliferación algal ha disminuido considerablemente representando un nivel bajo de riesgo para bañistas.	Filamentos de color verde-pardo
05/11/18 (INF-18-08)	Abundantes grumos y filamentos de color verde, se detectó alta abundancia de las cianobacterias <i>Microcystis cf. aeruginosa</i> y <i>Lyngbya sp</i> , con un nivel de riesgo alto para bañistas.	Filamentos de color verde
03/12/2018 (INF-18-11)	Se encontraron grumos y filamentos de color verde, característicos de una proliferación de cianobacteria. En general, se encontraron bajas abundancias de las cianobacterias <i>Lyngbya sp.</i> y <i>Microcystis cf. Aeruginosa</i> . En el sector de Pedrero Hondo presentaron altas abundancias de <i>Lyngbya sp</i> , dicha proliferación se localizó en este sector y no se ha diseminado con la misma magnitud al resto del lago	Filamentos de color verde
11/02/2019 (INF-19-01)	Abundantes filamentos de color verde oscuro, característicos de una proliferación de cianobacterias. La especie más abundante detectada fue <i>Lyngbya sp.</i> en concentraciones que constituyen un riesgo moderado para bañistas.	Filamentos de color verde oscuro
20/06/2019 (INF-19-08)	Se observó coloración “turquesa” en todo el cuerpo de agua, sin observar acumulaciones densas de cianobacterias. Las concentraciones celulares de las cianobacterias identificadas presentan riesgo bajo o nulo en aguas recreacionales. Se encontraron estructuras cristalinas no identificadas en gran abundancia, al igual que se ha detectado en los años 2016, 2017 y 2018, la cuales únicamente aparecen cuando el lago cambia completamente de color.	Coloración turquesa
26/06/2019 (INF-19-09)	Aún persistía la coloración “turquesa” en todo el cuerpo de agua, no se identificaron acumulaciones densas de cianobacterias. Las concentraciones celulares de cianobacterias encontradas representan riesgo bajo o nulo en aguas recreacionales.	Coloración turquesa
08/01/2020 (INF-20-01)	Muestras presentaban coloración verde oscuro con acumulaciones de filamentos, característicos de una proliferación de cianobacterias. La cianobacteria del género <i>Lyngbya</i> fue la más	Coloración verde oscuro con acumulaciones de filamento

	abundante representando un nivel de riesgo moderado para aguas recreacionales.	
12/02/2020 (INF-20-04)	La especie más abundante fue la cianobacteria <i>Lyngbya</i> sp, se detectaron otras cianobacterias como <i>Aphanocapsa</i> y <i>Gloeocapsa</i> en bajas concentraciones celulares, representando un nivel de riesgo bajo para bañistas.	Sin descripción del color del agua
22/03/2021 (INF-21-02)	Se encontraron bajas abundancias de la cianobacteria <i>Limnoraphis</i> cf. <i>birgei</i> , la abundancia representó un nivel bajo de riesgo para bañistas. Las proliferaciones no se extienden en todo el lago, sino que se distribuyen por parches, principalmente en función de la dirección e intensidad del viento.	Filamentos de color verde
25/06/2021 (INF-21-04)	Se observó coloración “turquesa” en todo el cuerpo de agua y abundante espuma. No se observaron acumulaciones superficiales densas de cianobacterias. La abundancia de cianobacterias representa un nivel de riesgo bajo para bañistas. Es poco probable que los pigmentos de las cianobacterias sean la causa del cambio de coloración “turquesa”.	Coloración turquesa
16/07/2021	No se detectaron parches de coloración verde o café, que pudiesen ser indicativos de una proliferación de cianobacterias. Tampoco se observó coloración turquesa. La abundancia de cianobacterias representa un nivel de riesgo bajo para bañistas.	Coloración normal

2.8.2. Resumen de las conclusiones del informe: “Establecimiento de línea base para la identificación de Cianobacterias potencialmente tóxicas del Embalse Cerrón Grande”

La investigación realizada por el Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales (DIPCA-UCA) de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas realizó una investigación de parámetros físicos, químicos y biológicos con muestreos mensuales desde octubre del 2018 hasta septiembre del 2019; obteniendo series temporales de los parámetros de temperatura, profundidad del disco Secchi, pH, nitrógeno, fósforo, clorofila-a e información sobre el fitoplancton. Donde se concluyó que alta carga de contaminantes orgánicos favorecen la proliferación masiva de organismos fitoplanctónicos, y que las concentraciones promedio más altas de estos organismos ocurrieron durante el periodo de época seca y al inicio de la estación lluviosa. Además, siguieron un muestreo mucho más denso para poder determinar mejores correlaciones entre las variables.

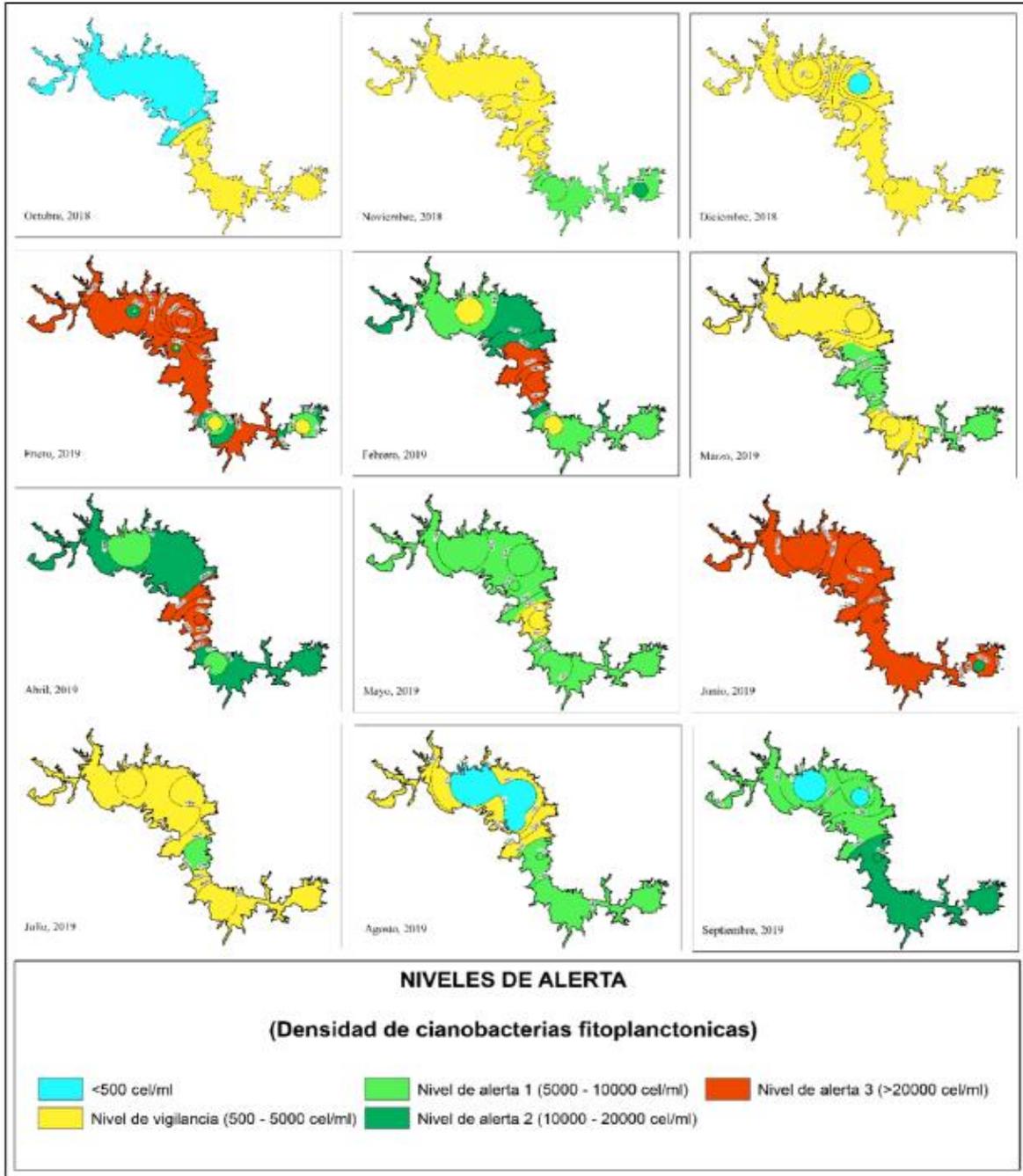


Figura 16 - Mapas de densidad de cianobacterias fitoplanctónicas en el Embalse Cerrón Grande, desde octubre 2018 hasta septiembre del 2019. Credits Rovira *et al* 2020.

METODOLOGÍA

La investigación denominada “*Estimación de índices y parámetros ambientales del agua a partir de imágenes multiespectrales Sentinel en el lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande de El Salvador durante el período 2017-2021*” pretende utilizar datos obtenidos por medio de teledetección para estimar los componentes ópticamente activos (OAC) de color, temperatura, clorofila-a y materia total suspendida. Adicionalmente, se obtendrá una estimación de la superficie del espejo de agua utilizando los índices NDVI, NDWI y SWM, y una estimación de la cantidad de algas presentes en el agua a partir del índice de algas flotantes FAI.

Los datos satelitales, medidos por los sensores MSI de Sentinel-2, y SLSTR de Sentinel-3, que pertenecen a la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), son de acceso libre y pueden ser descargados en el sitio web del Centro de Acceso Abierto de Copernicus. Los resultados estimados serán contrastados con registros de mediciones realizadas *in situ* en cada zona de interés (AI) realizadas por el Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de El Salvador (LABTOX-UES) y a la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, siendo: temperatura (°C), conductividad eléctrica (ppm), profundidad de disco Secchi (m) y clorofila (mg/m³).

Finalmente, en cada AI, las estimaciones serán analizadas e interpretadas de acuerdo con su dinámica particular. El Lago de Coatepeque se ubica sobre una caldera volcánica en una cuenca endorreica; el Embalse Cerrón Grande es producto de una represa artificial en el río Lempa, pertenece a una cuenca transfronteriza, afectado por aguas vertidas de la ciudad de Santa Ana y el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Además, ECG es uno de los humedales más importantes de El Salvador. Por tanto, se analizará la distribución espacial y temporal de los parámetros estimados con el objetivo de caracterizar el estado de los cuerpos de agua en el periodo 2017-2021.

3.1. Zonas de estudio

El Lago de Coatepeque (LC) y el Embalse Cerrón Grande (ECG) son cuerpos de agua continentales, pertenecientes a el país de El Salvador (ver figura 16), ubicado en Centroamérica. Los principales factores que condicionan la hidrología y geomorfología local son la abundante precipitación y la intensa actividad volcánica respectivamente. El LC se ubica dentro la caldera de Coatepeque (Kutterolf *et al*, 2020) y es parte del complejo volcánico de Santa Ana (SNET, s.f); el ECG se ubica el valle interior entre el complejo del volcán de Guazapa al sur y la cordillera norte de El Salvador (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2018) que corresponde a la antigua cadena volcánica del país.

La ubicación ecuatorial de El Salvador condiciona la cantidad y calidad de imágenes satelitales disponibles por la presencia de abundante nubosidad asociada a la Zona de Convergencia Intertropical. Localmente, se distinguen dos temporadas climáticas en el país, la época seca (nubosidad reducida) y la época lluviosa (abundante nubosidad), y sus periodos de transición. La época seca se presenta entre los meses de noviembre a abril, es un período altamente influenciado por frentes fríos descendentes de latitudes medias, que inhiben la precipitación (e incrementan la velocidad de los vientos a moderados y fuertes).

La época lluviosa ocurre de mayo a octubre con un intervalo de reducción de las lluvias entre julio y agosto llamado canícula. El mes más lluvioso es septiembre, seguido por el mes de junio (SNET, 2005).

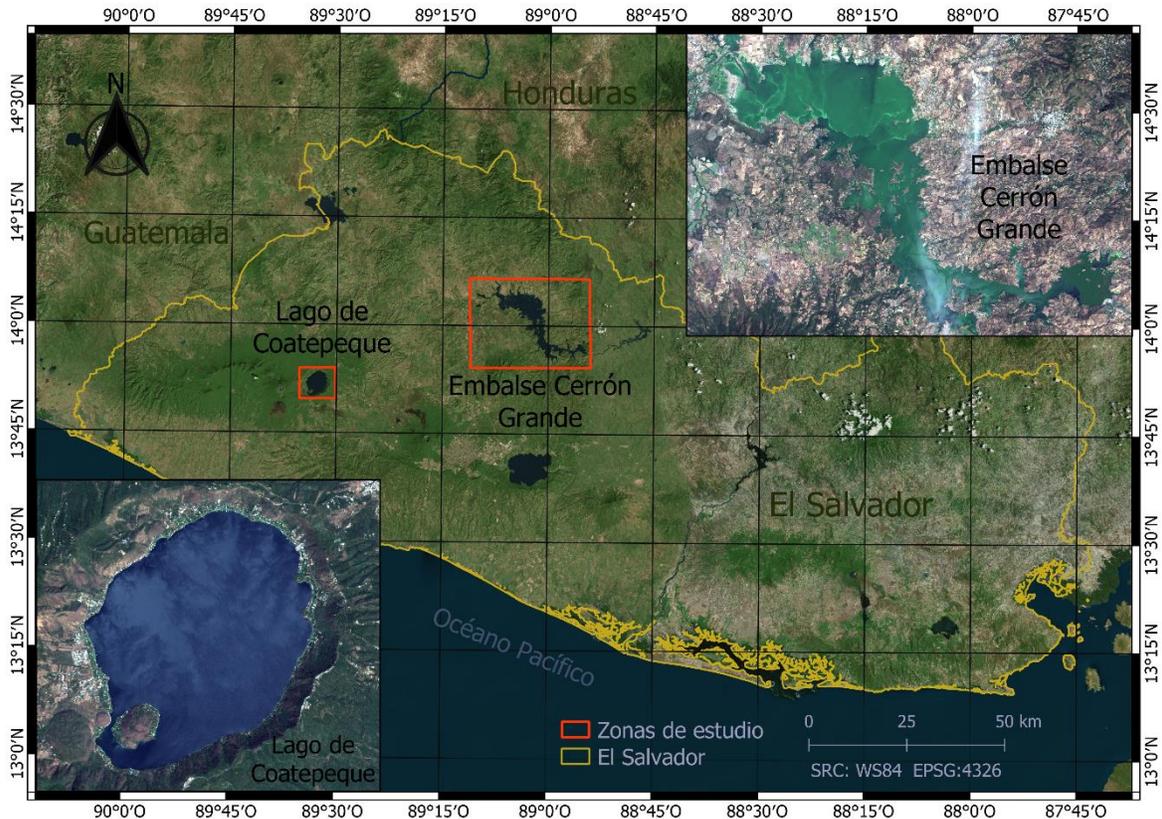


Figura 17 - Mapa de ubicación de zonas de interés, lago de Coatepeque y Embalse Cerrón Grande de El Salvador.

El Salvador se encuentra dividido en diez regiones hidrográficas (figura 17) con características geomorfológicas similares (SNET, 2005). La Región Hidrográfica Lempa (RHL) es una cuenca trinacional un área total de 17,790 km², de los cuales, 10,082 km² corresponden a El Salvador, 5,251 km² a Honduras y 2,457 km² a Guatemala. La longitud del cauce principal es de 422 km de los cuales 360.2 km corren dentro de territorio salvadoreño (Hernández, 2005), con desembocadura en el océano Pacífico. En su trayecto existen 3 centrales hidroeléctricas, la presa Cerrón Grande con el cuerpo de agua más grande de El Salvador, la segunda en su trayecto es la presa 5 de Noviembre y la última es la presa 15 de Septiembre.

Dentro de la RHL se establece a la Subcuenca Embalse Cerrón Grande como la zona de influencia de las aguas del río Lempa, ya que todas las aguas en esta región corren naturalmente hacia el embalse de la presa hidroeléctrica Cerrón Grande. Esta subcuenca se ubica al oeste de la RHL, abarca un área de 8,560 km² e incorpora territorio de Guatemala, Honduras y El Salvador. Algunos de los afluentes principales del río Lempa son los ríos Suquiapa (con vertidos de la ciudad de Santa Anta), Sucio y Acelhuate (vertidos de AMSS).

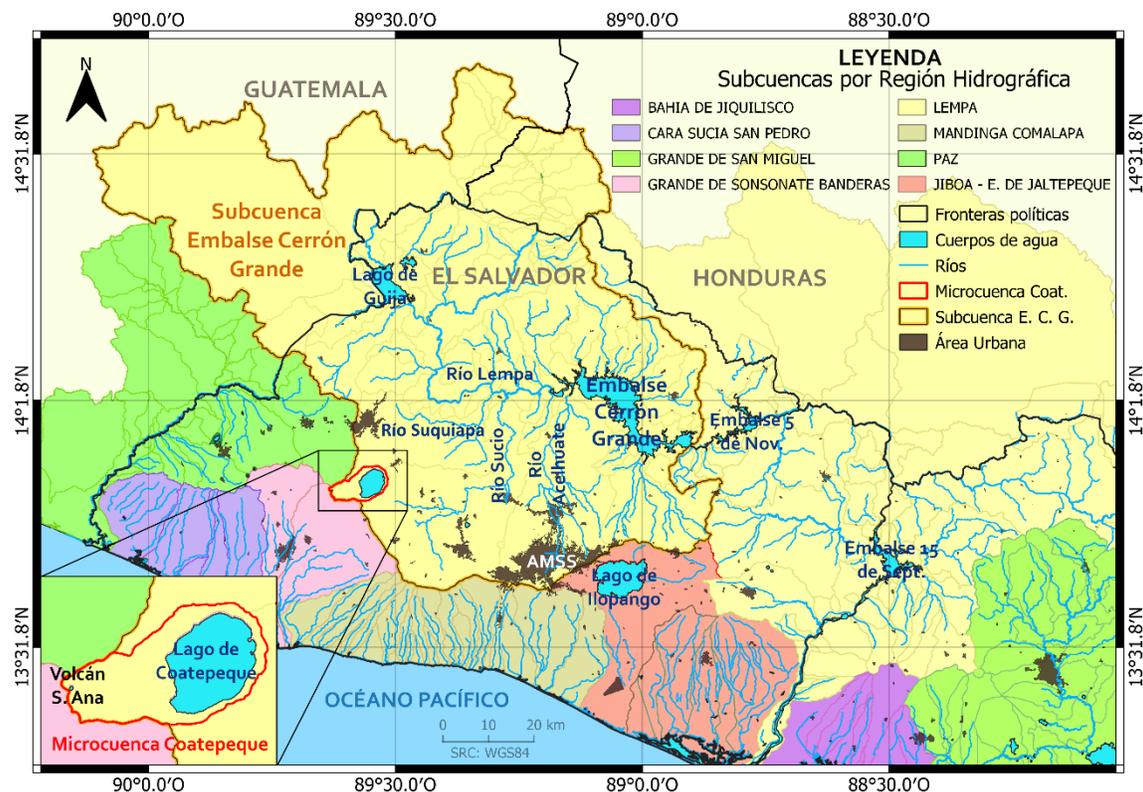


Figura 18 - Mapa de ubicación de la Subcuenca Embalse Cerrón Grande y la Microcuenca Coatepeque, ambas pertenecientes a la Región Hidrográfica Lempa (RHL).

La Microcuenca Coatepeque forma parte de la subcuenca EGC, es una cuenca endorreica que alberga al lago de Coatepeque (LC), se encuentra delimitada por el contorno de la caldera de Coatepeque, el cráter del volcán de Santa Ana (también conocido como volcán llamatepec) y el Cerro Verde (un volcán extinto), posee un área de 65.9 km², ubicada en la zona occidental de El Salvador. El único ingreso de agua en la microcuenca es por medio de la precipitación, el agua escurre por las quebradas y drena hacia el lago; el agua subterránea del lago infiltra y se mueve en dirección noroeste, alimentando la cuenca de Río Suquiapa (Batres, 2018).

3.1.1. Embalse Cerrón Grande

El embalse Cerrón Grande se formó por la inundación de tierras ribereñas sobre el cauce medio del río Lempa, a raíz de la construcción de la represa hidroeléctrica. Constituye el mayor cuerpo de agua dulce del país, pero es a la vez el más contaminado. La elevación del espejo de agua: 240 msnm. Los espejos de agua forman parte del sistema de humedales del embalse Cerrón Grande (MARN, 2018). Se ubica entre las latitudes 13°54'48.8"N - 14°05'58.2"N y longitudes 88°53'55.4"O - 89°09'07.3"O.

El nivel del agua depende de la pluviosidad estacional y de las descargas de agua embalsada realizadas casi exclusivamente con criterios de producción hidroeléctrica. En general, se alcanza la cota máxima en 243 msnm al final de la época lluviosa (octubre), para ir descendiendo de nivel a partir de diciembre con un promedio anual de 12 metros. Estas bajas en el nivel del agua, provocan el establecimiento de playones y lagunas estacionales. Los espejos de agua experimentan marcadas fluctuaciones entre las épocas

seca con una extensión aproximada 69 km², y en la época lluviosa incrementa a 102.24 km² (MARN, 2018).

El embalse recibe la mayor cantidad de desechos industriales y orgánicos de todo El Salvador. A sus aguas llegan los vertidos sin tratar del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) y ciudades cercanas a través del río Acelhuate; de la ciudad de Santa Ana a través del río Suquiapa; de Quezaltepeque, Ciudad Arce y zonas agroindustriales mediante el río Sucio, junto con los vertidos de las ciudades limítrofes de Chalatenango y Suchitoto (Jiménez, y Sánchez, 2004); Estos ríos representan el 30 % del caudal que entra al humedal Cerrón Grande, trasladan descargas contaminantes de 157 fuentes: 54 industrias, 55 beneficios de café, siete ingenios azucareros, 29 redes de alcantarillas y nueve rastros municipales. El Índice de Calidad de Agua (ICA), de estos tres ríos varía entre malo y pésimo (MARN, 2018).

En el ECG existe vegetación acuática sumergida asentada sobre suelos limosos en la mayor parte del espejo de agua, y vegetación flotante con el predominio de grandes bancos del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), una especie exótica invasora con altísimo potencial de crecimiento que ocupa decenas de hectáreas especialmente cerca de la represa del embalse. El jacinto de agua disminuye la superficie de espejo de agua, favorece la eutrofización de la laguna y de algunos meandros, y supone una amenaza para la vegetación sumergida (Jiménez, y Sánchez, 2004).



Figura 19 - Imágenes del Embalse Cerrón Grande con (A) alta contaminación y (B) con abundante cubierta de jacinto de agua. Créditos a E. Estévez y R. Simán, respectivamente.

3.1.2. Lago de Coatepeque

El lago Coatepeque es un lago de cráter ubicado al este de la Caldera Coatepeque, que forma parte del complejo volcánico Santa Ana-Izalco-Coatepeque. Se formó entre 50 y 70 ka como resultado de un colapso volcánico (Pullinger, 1998). Las erupciones posteriores a la caldera produjeron conos de ceniza basáltica y flujos de lava cerca del margen occidental de la caldera y cúpulas de lava riodacítica a lo largo de una fractura orientada al NE-SO (Cabassi *et al*, 2019). La isla del Cerro es la única de LC, que es en sí misma otro pequeño volcán, con cráter propio, actualmente escondido por la exuberante vegetación (MARN, 2018).



Figura 20 - Modelo 3D de la microcuenca Coatepeque con exageración vertical, delimitada por el volcán Ilimatepec, cerro verde y la estructura de la caldera de Coatepeque.

El lago se encuentra dentro de la región hidrográfica Lempa, cuenca del río Lempa, subcuenca ECG y dentro de la microcuenca Coatepeque. Tiene un área de 25.3 km², una profundidad máxima de 115 m, con una elevación del espejo de agua a 740 msnm (MARN, 2018). Está alojado dentro de un cráter de forma elíptica con ejes principales de 6,9 km (NE-SW) y 4,9 km (NW-SE) (Cabassi *et al*, 2019). Se ubica entre las latitudes 13°50'07.0"N - 13°53'30.6"N, y longitudes 89°34'30.1"O - 89°31'22.9"O.

La existencia y persistencia de un lago volcánico se rige por el equilibrio entre las entradas de agua (precipitaciones, descargas subterráneas, entradas) y salidas (evaporación, filtraciones, salidas). Las aguas de LC se caracteriza por una composición de Na⁺ -Cl⁻. La explicación más confiable para esta química peculiar implica la entrada de fluidos profundamente arraigados; resultados simulaciones muestran que la composición del agua del lago Coatepeque se puede reproducir mezclando los miembros terminales meteórico e hidrotermal en 45% - 55%, respectivamente (Cabassi *et al*, 2019).

El uso más importante en la zona es el turístico y recreativo que ha modificado las orillas con el desarrollo urbanístico. Existe contaminación por desechos sólidos y aguas grises provenientes de los asentamientos humanos, casas vacacionales, así como por agroquímicos provenientes de las parcelas agrícolas ubicadas sobre las paredes internas del cráter que contiene el cuerpo de agua (MARN, 2018).

La microcuenca Coatepeque incorpora parte de la zona este del volcán de Santa Ana (Ilimatepec). Este volcán presentó actividad eruptiva en 2005, impulsada por una intrusión riolítica de pequeño volumen en niveles poco profundos, provocando explosiones freáticas con lanzamiento de bloques en trayectorias balísticas y produciendo varias corrientes de densidad piroclásticas hidromagmáticas (Scolamacchia, 2009). Parte del material expulsado y que sedimento en la microcuenca fue incorporado al lago a través de la escorrentía superficial producto de las precipitaciones.

El lago experimenta de manera anual cambios de coloración a turquesa (ver figura 18B), este fenómeno podría estar relacionado a la actividad volcánica propia del lago, es decir, puede tratarse de un proceso natural (MARN, 2018). De acuerdo a informes de reportes del Laboratorio de Toxinas Marinas desde el 2017 hasta 2021, el LC ha cambiado de coloración turquesa en 3 ocasiones. LABTOX-UES concluyó que la cianobacterias en la columna de agua no son la causa del cambio de coloración “turquesa” que se observa en el Lago de Coatepeque; además, informó de la presencia de abundantes estructuras cristalinas en el agua durante el periodo de coloración turquesa.

Adicionalmente, LABTOX-UES ha informado la presencia de filamentos y colonias macroscópicas de cianobacterias con tonalidad verde en 5 ocasiones, en el periodo 2017-2021. Estas colonias tienen a acumularse en la superficie del lago y generar una tonalidad verde oscura en el agua (figura 18C).



Figura 21 - Imágenes del lago de Coatepeque con (A) coloración normal, (B) con cambio de coloración turquesa con bandas de espuma blanca, y (C) presencia de algas.

3.2. Datos satelitales

La base de datos satelitales fue obtenida desde el Centro de acceso abierto de Copernicus (ESA, 2022), que provee información completa, gratuita y de acceso libre a los productos de la constelación de satélites Sentinel, proveyendo la información satelital necesaria para esta investigación. Se descargarán 3 productos diferentes, de los sensores MSI de Sentinel-2 (S2), y SLSTR de Sentinel-3 (S3) para la zona del Lago de Coatepeque y Embalse Cerrón Grande de El Salvador, en el periodo 2017-2021.

La razón de selección del sensor MSI-S2 son las bandas espectrales de alta resolución de la superficie de los cuerpos de agua en el espectro visible e infrarrojo cercano, obteniendo información del color, absorción y transparencia del agua, algas, microalgas, sedimentación, vegetación flotante, entre otros. La selección de SLSTR-S3 se debe a la medición del infrarrojo térmico emitidos por los cuerpos de agua, específicamente las bandas S7, S8 y S9, (ver tabla 4) obteniendo la temperatura de la superficie terrestre. A continuación, se describen los productos Sentinel (ESA, s.f.-b).:

▪ S3A_SL_2_LST

El producto SLSTR Nivel-2 LST del Sentinel-3 proporciona parámetros de la superficie terrestre generados a una amplia cuadrícula de 1 km de ancho. Contiene un archivo de medición con los valores de la temperatura de la superficie terrestre (LST), índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), código de clasificación de superficie GlobCover, cobertura vegetal fraccionada, vapor de agua total de la columna y parámetros auxiliares asociados (ESA, s.f.-b).

▪ S2B_MSIL1C

El producto MSI Nivel-1C del Sentinel-2 está compuesto por una cuadrícula de 100x100 km² (orto-imágenes en proyección UTM / WGS84). Las mediciones radiométricas por píxel proporcionan reflectancias de la parte Superior de la Atmósfera (TOA) a distancias de muestreo en suelo constantes de 10, 20 y 60 m, su alta resolución permite la identificación precisa de los eventos en la superficie terrestre y cuerpos de agua. El producto posee únicamente correcciones radiométricas y geométricas. Adicionalmente, incluyen máscaras de nubes y datos ECMWF (columna total de ozono, columna total de vapor de agua y presión media al nivel del mar) (ESA, s.f.-b).

3.2.1. Base de datos satelitales

La base de datos, resumida en la tabla 5, es compuesta por los productos satelitales de los sensores Sentinel MSI y SLSTR que recopilación información óptica del Lago de Coatepeque (LC) y el Embalse Cerrón Grande (ECG) en el periodo 2017-2021; ésta será utilizada para analizar el color, temperatura, clorofila-a, materia total suspendida, superficie espejo de agua y vegetación flotante. El total imágenes satelitales S2 MSI nivel-1 fue de 506 y 787 imágenes de S3 SLSTR nivel-2.

El principal criterio para selección de las imágenes satelitales Sentinel fue con relación a la nubosidad, en la que no debía cubrir más del 60% del cuerpo de agua para poder identificar las señales ópticas provenientes del agua.

Tabla 5 - Imágenes satelitales Sentinel-2 y Sentinel-3 adquiridas, periodo 2017-2021.

Año	S2 MSI L1	S3 SLSTR L2	Total Global
2017	64	67	131
2018	115	144	259
2019	112	197	309
2020	102	162	264
2021	113	217	330
Total	506	787	1293

3.3. Registros de datos de los cuerpos de agua

Los registros de medidas *in situ* en LC y EGC tomados en el periodo 2017-2021 fueron obtenidos, en su mayoría gracias al Laboratorio de Toxinas Marinas (LABTOX-UES) realizadas como parte de sus proyectos ambientales e investigaciones académicas lideradas por C. Guirola en ECG, y por J. Guerra en LC. Complementariamente, registros *in situ* fueron tomados de la publicación “Establecimiento de línea base para la identificación de Cianobacterias potencialmente tóxicas del Embalse Cerrón Grande”, investigación

realizada por Rovira, M. *et al* (2020) de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA). Los registros utilizados son: temperatura (°C), conductividad eléctrica (ppm), profundidad de disco Secchi (m) y clorofila-a (mg/m³).

Tabla 6 – Registros de mediciones *in situ* en el periodo 2017-2021 en lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande.

Mes	2017		2018		2019		2020		2021	
	LC	ECG	LC	ECG	LC	ECG	LC	ECG	LC	ECG
Enero	-	-	1	-	-	1	-	1	-	-
Febrero	-	-	1	-	-	1	-	1	1	-
Marzo	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-
Abril	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-
Mayo	-	-	1	-	1	2	-	-	-	-
Junio	-	-	1	-	-	2	-	-	1	-
Julio	1	-	-	-	-	2	-	-	1	-
Agosto	1	-	1	-	1	2	-	-	-	-
Septiembre	2	-	-	-	-	2	-	-	-	-
Octubre	1	-	-	1	-	1	1	-	-	-
Noviembre	1	-	1	1	-	-	1	-	-	-
Diciembre	1	-	-	1	-	1	1	-	1	-
Total	7	0	8	3	2	16	3	2	6	0
Total ECG: 21						Total LC: 26				

Nota. Lago de Coatepeque (LC). Embalse Cerrón Grande (ECG).

3.4. Procedimiento

En rasgos generales, la metodología consiste en los pasos necesarios para extraer información de los pixeles de cada banda espectral en las imágenes satelitales, aplicándoles operaciones matemáticas para generar series temporales de datos de los parámetros ambientales. Por tanto, el proceso se divide en 7 partes, en el siguiente orden: el preprocesamiento, operaciones matemáticas o cálculo de índices de agua, extracción de datos de temperatura, determinación del espejo de agua y algas flotantes, procesado en C2RCC e identificación del color del agua; además se elaborarán imágenes y promedios mensuales de las variables.

En rasgos generales, en el preprocesamiento se recorta la imagen a las áreas de interés y remuestrea a 10 m de resolución todas las bandas, como preparación para el cálculo de índices. Para determinar espectralmente el espejo del agua se utilizan los índices SWM, NDVI y NDWI resultando en una geometría superficial donde se extraerá en color del agua, se estimará la clorofila-a y materia total suspendida, se calculará el índice FAI. La temperatura será extraída a partir de coordenadas seleccionadas dentro de los cuerpos de agua. Los resultados posteriormente serán evaluados entre variables y entre cuerpos de agua para estudio de la variabilidad temporal. Además, se correlacionarán con registros de medidas *in situ* en los respectivos sitios de interés, el Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande, en el periodo 2017-2021.

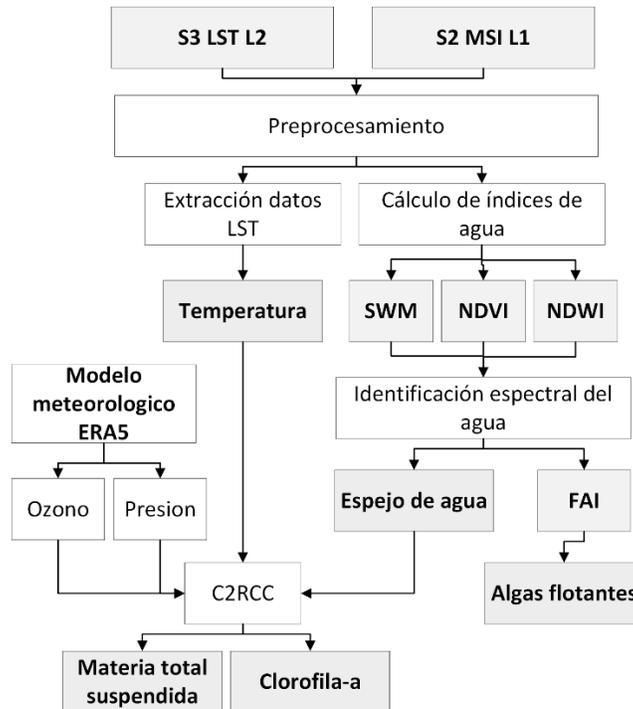


Figura 22 - Diagrama de la metodología empleada en la investigación.

3.4.1. Preprocesamiento

El primer paso es reducir el tamaño de los archivos a una fracción, optimizando el proceso y reduciendo el tiempo de procesamiento. Es realizado en SNAP, donde cada banda espectral será recortada a las áreas de interés (AI); adicionalmente, a las imágenes MSI-S2 se les realiza un remuestreo de los píxeles de cada banda, para obtener una resolución espacial de 10 metros en todas las bandas. La banda LST del producto SLSLTR-S3 posee una resolución de 1 km.

El recorte se realiza en todas las imágenes satelitales S2 y S3, en las áreas de interés que comprenden al lago de Coatepeque dentro de la cuadrícula 13°50'07.0"N, 13°53'30.6"N, 89°34'30.1"O 89°31'22.9"O, y el embalse Cerrón Grande dentro de la cuadrícula 13°54'48.8"N, 14°05'58.2"N, 88°53'55.4"O, 89°09'07.3"O.

3.4.2. Extracción de temperatura superficial del agua

Posterior al recorte de SLSLTR-S3 nivel-2 sobre las áreas de interés, se les aplica una reproyección a al sistema coordinado WGS84, este paso es necesario para identificación de coordenadas. Para la extracción de valores de temperatura de la banda LST (Land Surface Temperatura) se establecen coordenadas distribuidas en todo el cuerpo de agua para extracción de información de los píxeles, las ubicaciones aseguran extraer información la temperatura del agua superficial, sin ruido asociado a las orillas y contornos de los cuerpos de agua. La resolución espacial nominal de las imágenes S3 LST es de 1×1 Km² en la superficie terrestre.

En el Lago de Coatepeque (de 25,3 km²) se definieron 5 puntos; similarmente, en el Embalse Cerrón Grande (con una superficie mínima de 69 km²) se definieron 14

coordenadas de extracción de datos (ver tabla 7 y figura 20), distribuidas en todo el cuerpo de agua incluyendo cercanías a los principales ríos afluentes, medianías y en la parte final próxima a la represa.

Tabla 7 – Coordenadas para extracción de datos LST.

No	Lago de Coatepeque		Embalse Cerrón Grande	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
1	13.8699449	-89.5551517	14.0582715	-89.0862488
2	13.8700715	-89.5427906	14.0544178	-89.0998055
3	13.8594446	-89.5549781	14.0642885	-89.0704386
4	13.8598142	-89.5426166	14.0583833	-89.0473289
5	13.8514104	-89.5456622	14.0480833	-89.064556
6	-	-	14.0474584	-89.0310707
7	-	-	14.0346001	-89.0483742
8	-	-	14.0230798	-89.0394658
9	-	-	14.029587	-89.0263942
10	-	-	13.987450	-89.0160398
11	-	-	13.948078	-89.0002865
12	-	-	13.965129	-89.0152674
13	-	-	13.9474036	-88.9783467
14	-	-	13.9474466	-88.9199545

Nota. Sistema coordinado WGS84. La resolución espacial de bandas de S3 LST L2 es 1 Km.

La extracción de valores de temperatura de los cuerpos de agua se realizó en SNAP a partir de las imágenes satelitales S3 LST L2, generando un archivo de Valores Separados por Comas (.csv) con los valores de temperatura para cada coordenada. Posteriormente se generó un código Python para generar promedios diarios de las imágenes, donde se aplicaron criterios de selección: temperaturas en un rango específico (máximo y mínimo) en cada cuerpo de agua, valores de NDVI mayores a cero, mascara de cubierta (Biome) asociada a un cuerpo de agua y mascara de nubes (Cloud) con valores cercanos a cero.

Las bandas LST de cada uno de los productos satelitales serán utilizados para generar imágenes de la temperatura superficial (°C) de los cuerpos de agua del Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande; a cada distribución de temperatura se le aplicará una gama de colores para mejorar la visualización. Además, se elaborarán promedios mensuales para análisis en variación temporal y espacial.

3.4.3. Tratamiento de datos para obtener líneas temporales

Los resultados de las estimaciones presentan una limitante, generan información únicamente en la fecha en la que la imagen satelital fue adquirida. Para generar una señal continua es necesario realizar un análisis de las series de tiempo, por lo cual se aplica el filtro Hodrick Prescott para obtener una tendencia continua en el periodo de la investigación (2017-2021). Además, se aplica una interpolación lineal entre valores obtenidos para rellenar las fechas que presentan ausencia de información, así complementar la información generada. Este proceso es realizado en todas las variables estimadas, el tratamiento de los datos es la etapa previa para obtener la línea temporal de la variable LST.

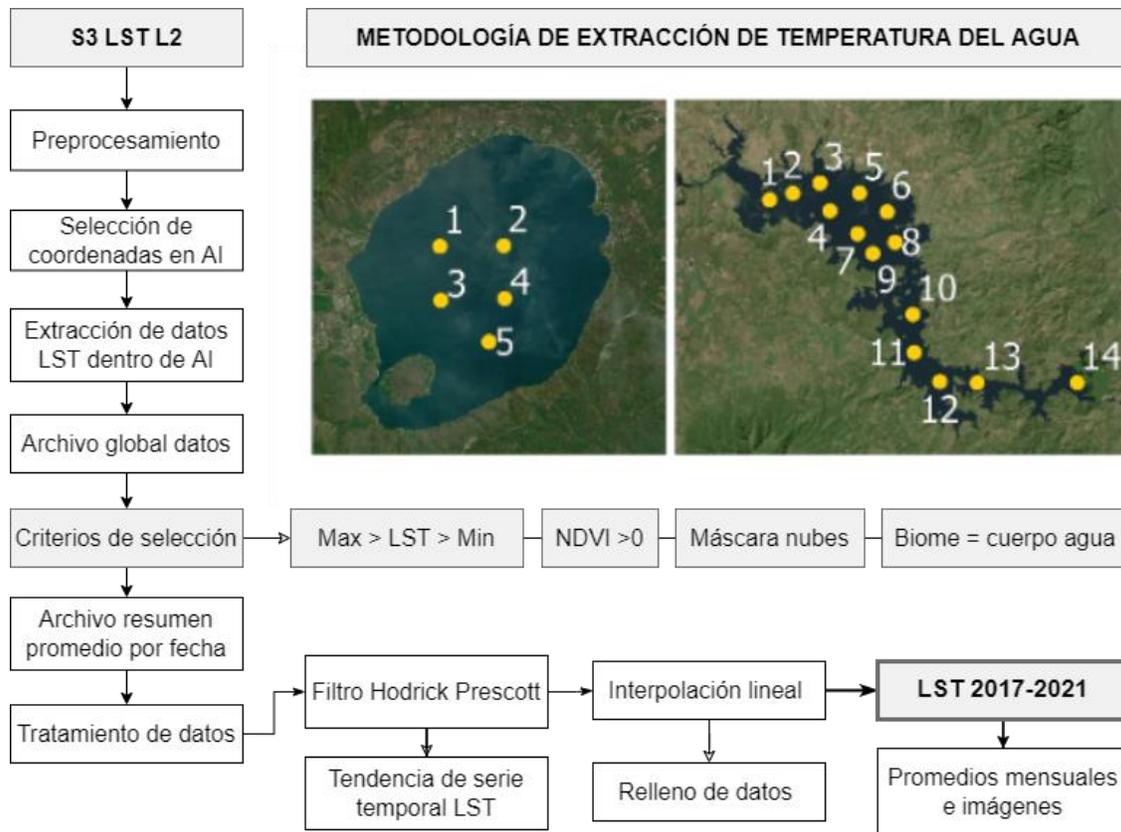


Figura 23 - Diagrama de la metodología para extracción de la temperatura superficial del agua.

3.4.4. Operaciones entre bandas espectrales para generación de índices del agua

Los índices de agua requeridos en la investigación son: NDVI, NDWI y FAI, éstos se pueden obtener a partir de operaciones matemáticas entre las bandas espectrales de las imágenes satelitales (tabla 8). Las ecuaciones de los índices requieren rangos espectrales específicos debido a que generan productos asociados a fenómenos de la naturaleza. El índice NDVI permite la identificación de agua y vegetación. El índice NDWI facilita la identificación de agua. El índice FAI brinda información del estado de la vegetación. Estas características permitirán estimar la superficie del espejo de agua y la cubierta vegetal flotante presente en el Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande.

Tabla 8 - Tabla de expresiones matemáticas de índices de agua.

Índice	Expresión general	Expresión Sentinel-2
NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	$\frac{B08 - B04}{B08 + B04}$
NDWI	$\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$	$\frac{B03 - B08}{B03 + B08}$

	$FAI = NIR - NIR'$	$FAI = B08 - NIR'$
FAI	$NIR' = RED + (SWIR - RED) \times \left[\frac{\lambda(NIR) - \lambda(RED)}{\lambda(SWIR) - \lambda(RED)} \right]$	$NIR' = B04 + (B11 - B04) \times \left[\frac{832.8 - 664.6}{1613.7 - 664.6} \right]$
SWM	$SWM = \frac{BLUE - GREEN}{NIR + SWIR}$	$SWM = \frac{B2 + B3}{B8 + B11}$

Nota. OLCI-S3 no mide el espectro SWIR, sí el visible y NIR. λ es el valor de la longitud de onda.

3.4.5. Estimación de la superficie del espejo de agua y cubierta de algas flotantes

Las bandas espectrales expresan la energía electromagnética reflejada por la superficie, las señales pueden ser utilizadas para identificar el material presente. Consecuentemente, el uso de expresiones en función de bandas nos permitirá diferenciar el agua de las orillas, identificar si existen microalgas en suspensión que reflejen tonalidad verde, así como vegetación flotante como algas, una densa capa de microalgas o jacinto de agua. Por tanto, se utilizarán los resultados de los índices SWM, NDWI, NDVI y FAI para identificar y clasificar píxeles asociados a agua y vegetación flotante.

- **Cálculo del espejo de agua**

La superficie del espejo de agua es la geometría identificada espectralmente como agua a partir de los resultados de los índices SWM, NDWI y NDVI, cada uno tiene un rango de valores específicos asociados a agua. El NDVI debe ser menor a 0.1, donde los valores menores a cero son indicadores de agua, el rango de 0 a 0.1 puede ser asociada a las débiles señales de algas en el agua. El NDWI debe ser mayor a 0, valores entre 0.2 y 1 están directamente asociados a agua, y el rango entre 0 y 0.2 corresponde a zonas muy humadas como zonas inundadas con charcos. El SWM de ser mayor a 0.8 para identificar cuerpos de agua.

Todos los píxeles que cumplan las condiciones conformarán la máscara de agua, la sumatoria de la cantidad de píxeles por las dimensiones de los píxeles determinará la superficie del espejo de agua. Sentinel-2 MSI provee una resolución de píxel de $10 \times 10 m^2$.

- **Cálculo de la cubierta algas flotantes**

Para el análisis de algas flotantes se toman en cuenta 2 condiciones dependientes de la cantidad de materia vegetal presente en suspensión y flotando en el agua. La primera, son cantidades bajas y moderadas de algas y microalgas en suspensión o flotando en el agua. Espectralmente son identificadas como aguas que incorporan tonalidades verdes o marrones por la clorofila-a de la vegetación. En esta superficie de agua se clasifican los píxeles entre rangos de valores de índice FAI como vegetación baja ($x < 0.008$), media ($0.008 \leq x \leq 0.13$) y alta ($x > 0.13$), se cuantifican los grupos y se obtiene un porcentaje de cada clase respecto a la superficie del espejo de agua utilizada.

La segunda, es la señal espectral producida por vegetación densa que flota en la superficie del agua, identificada como píxeles totalmente verdes producidos por la presencia de jacinto de agua y densas capas o acumulaciones de microalgas similares a una alfombra verde. Estas señales espectrales presentan la dificultad de asemejarse a la vegetación sana en tierra como pasto, cultivos y bosque. En este caso, los índices de NDVI y SWM utilizados

para extraer la máscara de agua excluirán este tipo de píxeles, a pesar de que en la realidad sean productos directos de algas flotantes; por este motivo es fundamental la verificación en campo.

3.4.6. Adquisición del color del agua

Las reflectancias de los colores rojo (nm), verde (nm) y azul (nm) son utilizadas para generar la imagen a color verdadero (RGB), así es posible analizar el color del agua y vegetación. El color del agua se extrajo recortando cada banda de reflectancia con la geometría identificada espectralmente como agua.

Tomando las reflectancias del agua en cada fecha se calculó el promedio diario con el propósito de generar un valor único asociado al color rojo, un valor promedio verde y uno azul, resultando valores generalizados por imagen. Utilizando todos los datos del periodo estudiado (2017-2021) se realizaron promedios mensuales con las series de valores del color rojo, la serie verde y la azul, estos valores serán utilizados para obtener un color único mensual y producir una secuencia de colores en el tiempo.

3.4.7. Estimación de clorofila-a y materia total suspendida

La clorofila-a (Chl-a) y materia total suspendida (TSM) presentes en los cuerpos de agua es estimada utilizando el procesador C2RCC, éste utiliza las reflectancias de las imágenes satelitales nivel-1 de MSI-S2 y OLCI-S3 y redes neuronales entrenadas para encontrar las condiciones de materiales disueltos o en suspensión en el agua. Además, este es un proceso que involucra la corrección atmosférica, y estimación de múltiples componentes ópticamente activos y propiedades ópticas del agua. Este proceso se realiza donde los píxeles cumplen con condiciones para asegurar resultados en los cuerpos de agua, en esta investigación son: el índice de vegetación de diferencia normalizada debe ser menor a 0.1 ($NDVI < 0.1$), y que el índice de agua de diferencia normalizada sea mayor a cero ($NDWI > 0$).

C2RCC es calibrado a partir de información complementaria como la elevación del cuerpo de agua y las variables meteorológicas existentes para cada fecha de presión atmosférica y ozono, donde se utilizó información del modelo meteorológico ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF). Además, el procesador C2RCC fue calibrado con la serie temporal de temperatura de la superficie de los cuerpos de agua, extraídos a partir de las imágenes satelitales SLSTR-3.

Un archivo de lenguaje marcado extensible (.xml) almacena las especificaciones para el procesamiento, conteniendo: las condiciones para la máscara, los datos de variables meteorológicas y temperatura del agua, la red neuronal C2RCC nets por su consistencia en los resultados. Para optimización del procesamiento, se desarrolló un código Python para cada base de datos (MSI-S2 y OLCI-S3), que leyera las imágenes, modificara los parámetros meteorológicos a las fechas correspondientes y ejecutara el proceso automáticamente en la Línea de Comandos de SNAP para toda la base de información. Los resultados son almacenados en directorios establecidos por fechas, en carpetas anuales y mensuales como archivos NetCDF4.

Los productos de clorofila-a y materia total suspendida serán graficados, se le añadirá su respectiva gama de colores para facilidad de identificación de las magnitudes asociadas, siendo mg/m^3 para Chl-a y g/m^3 para TSM; estos serán almacenados como imagen.

Adicionalmente, se elaborarán promedios mensuales para cada cuerpo de agua, así obtener resultados comparables en el tiempo.

3.5. Evaluación de resultados estimados de imágenes satelitales

Los parámetros estimados de temperatura (°C), color del agua, espejo de agua (km²), vegetación flotante (km²), clorofila-a (mg/m³) y materia total suspendida (g/m³) obtenidos a partir de imágenes satelitales Sentinel, serán evaluados en 2 formas, como correlación con registros de medidas *in situ* y correlación temporal entre parámetros. Este proceso tiene la finalidad de conocer si los valores de los parámetros son concordantes a la realidad en magnitud y variabilidad temporal.

3.5.1. Correlación de parámetros satelitales con registros de datos

Las series temporales 2017-2021 de los parámetros satelitales estimados serán correlacionados gráficamente con información de registros para analizar si los datos son congruentes en magnitud y variabilidad en el tiempo. El total de registros (tabla 6) en el Lago de Coatepeque fueron 26 y en el Embalse Cerrón Grande fueron 21. En la gráfica de cada variable será sobre puesta los datos de los registros compartiendo el mismo sistema de unidad (ver tabla 9).

Para el caso del espejo de agua, las magnitudes van a ser comparadas con la superficie de los cuerpos de agua (km²) según datos del Inventario Nacional de Humedales (2018) publicados por MARN.

Tabla 9 - Imágenes satelitales Sentinel-2 y Sentinel-3 adquiridas, periodo 2017-2021.

Parámetro <i>in situ</i>	Parámetro satelital
Temperatura (°C)	Temperatura en la superficie del agua (°C)
Conductividad (ppm)	
Profundidad de disco Secchi (m)	Materia total suspendida (g/m ³)
Clorofila-a (mg/m ³)	Clorofila-a (mg/m ³)
Superficie del agua (km ²)	Espejo de agua (km ²)
Datos no disponibles	Vegetación flotante (km ²)

3.5.2. Correlación temporal entre parámetros

Todos los parámetros satelitales estimados (temperatura, color, Chl-a, TSM, espejo de agua y cubierta vegetal) serán graficados en forma ordenada con las mismas dimensiones temporales para el análisis conjunto del comportamiento temporal entre las variables, relaciones entre anomalías, identificación de recurrencia de eventos; en general, para estudiar la evolución temporal por cada cuerpo de agua en el plazo de 5 años (2017-2021).

RESULTADOS

Los resultados de la investigación se componen de los índices de agua (NDWI, NDVI, FAI) y los parámetros ambientales (color, temperatura, clorofila-a, materia total suspendida, vegetación flotante y superficie del espejo de agua) estimados para el lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande, a partir de una base de imágenes satelitales de Sentinel-2 y Sentinel-3 en el periodo 2017-2021.

4.1. Estimación de índices de agua para el Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande

El cálculo para estimar los índices de (i) vegetación de diferencia normalizada (NDVI), (ii) el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), (iii) máscara de agua Sentinel (SWM) y (iv) el Índice de Algas Flotantes (FAI) se realizó en cada imagen satelital de la base de datos, a partir de las expresiones de la tabla 8 utilizando las bandas azul, verde, roja, infrarroja cercana e infrarroja de onda corta del Instrumento Multiespectral (MSI) de Sentinel-2. Este fue un proceso iterativo, realizado dentro del procesamiento previo al almacenamiento del producto para cada cuerpo de agua en estudio, el lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande.

Los resultados de los índices NDVI y NDWI sirvieron para determinar la geometría espectralmente identificada para cada cuerpo de agua, y para estimar materia total suspendida y clorofila-a. Los resultados del índice SWM sirvieron para establecer la superficie del espejo de agua. Los resultados del índice FAI sirvieron para estimar la vegetación flotante en los cuerpos de agua.

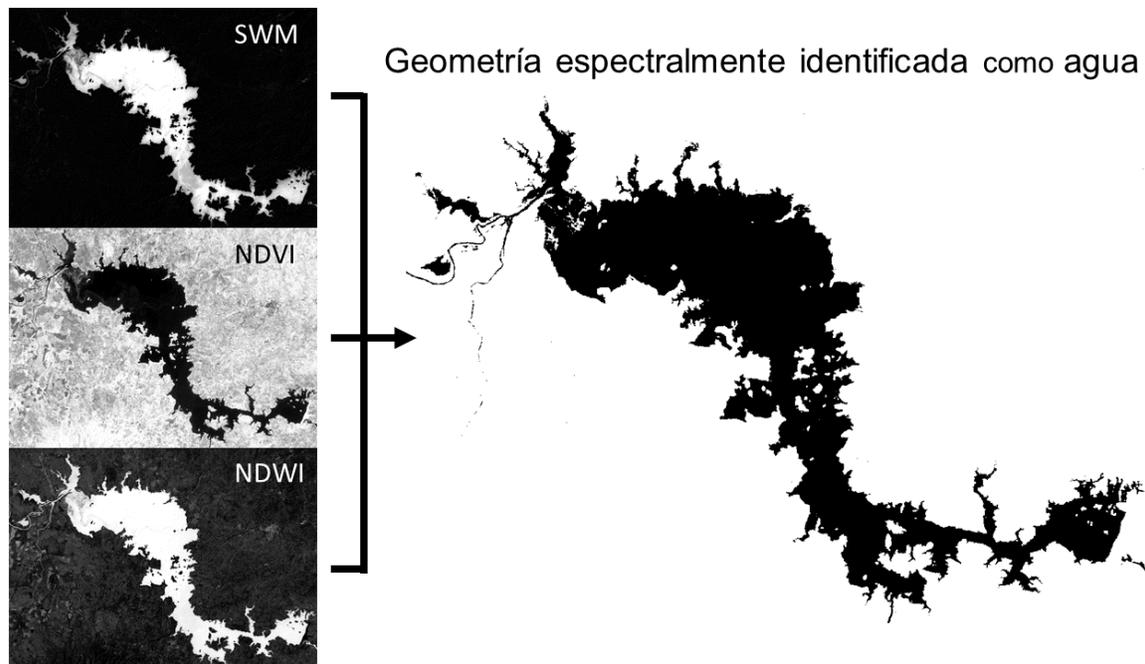


Figura 24 - Geometría espectralmente identificada como agua resultante del cálculo de los índices NDWI, NDVI y SWM.

4.2. Estimación de parámetros ambientales del Lago de Coatepeque

4.2.1. Espejo de agua

La superficie del espejo de agua del Lago de Coatepeque (LC) fue obtenida utilizando las imágenes satelitales limpias, con la condición de poseer un porcentaje inferior al 1% de píxeles asociados a nubes. Por tanto, se utilizaron 94 imágenes Sentinel-2 (S2-MSI) para obtener la variación temporal de la superficie visible del agua del lago, los píxeles utilizados son aquellos que cumplen con la condición de un índice $SWM > 0.8$; cada píxel cubre 0.0001 m^2 , realizando el conteo de los píxeles que cumplen las condiciones se obtiene la estimación de la superficie. La reducida cantidad de datos recopilados durante el 2017 se debe a la existencia de un solo satélite Sentinel-2 en órbita.

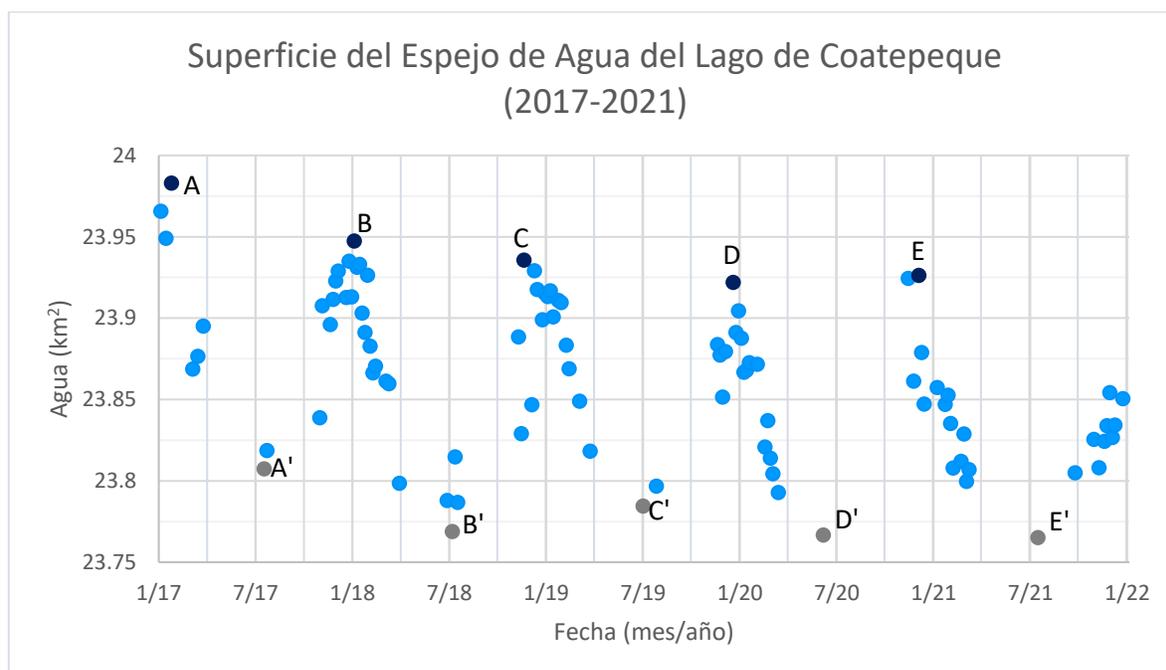


Figura 25 - Grafica temporal de la superficie del espejo de agua (km^2) del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

La tabla 10 presenta los valores máximos, mínimos y promedios de kilómetros cuadrados (km^2) de agua visible de LC. El promedio máximo en los años desde el 2017 hasta el 2021 es de 23.9424 km^2 de agua visible, el promedio mínimo es de 23.7823 km^2 de agua visible. El valor de superficie más grande percibido espectralmente ocurrió el 25 de enero del 2017 con 23.98 km^2 , y el valor sentido más pequeño de superficie ocurrió el 18 de julio del 2021 con 23.765 km^2 .

Es importante mencionar que el Lago de Coatepeque presenta una gran cantidad de muelles cuya reflectancia no estará asociada a agua, similarmente en las orillas del lago algunos píxeles no cumplen las condiciones por interferencia espectral de vegetación, arena, urbanización, etc.

Tabla 10 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la superficie (km²) del espejo de agua del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

ID	Fecha máximos	Máximo (km ²)	ID	Fecha mínimos	Mínimos (km ²)
A	25/01/2017	23.9829	A'	19/07/2017	23.8073
B	05/01/2018	23.9472	B'	09/07/2018	23.7687
C	21/11/2018	23.9356	C'	04/07/2019	23.7843
D	21/12/2019	23.9219	D'	08/06/2020	23.7666
E	05/12/2020	23.9261	E'	18/07/2021	23.7650
Promedio máximo		23.9427	Promedio mínimo		23.7784

Nota. Valores tomados de la gráfica 25 de la superficie del espejo de agua del Lago de Coatepeque.

4.2.2. Temperatura

La temperatura (°C) de la superficie del agua en el Lago de Coatepeque fue obtenida a partir de las imágenes Sentinel-3 (S3-SLSTR), generando una serie temporal a partir de 659 imágenes satelitales que cumplieron las condiciones de poca nubosidad, valor de NDVI de agua, valor de cubierta (biome) asociada a agua, y excluyendo valores atípicos. La amplia dispersión de las magnitudes de los valores puede ser debida al clima y el tiempo atmosférico como lluvia, viento, entre múltiples factores. Por tanto, se elaboró una línea de tendencia de la temperatura a partir de los datos, observada en la figura 26.

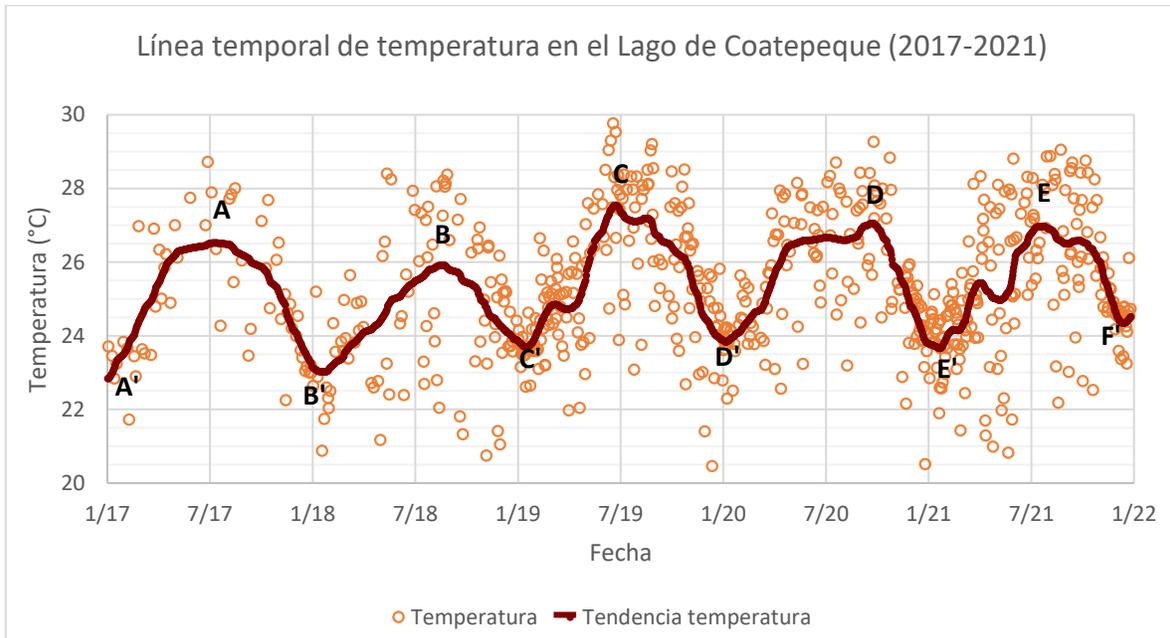


Figura 26 - Grafica temporal y línea de tendencia de temperatura (°C) del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

La tabla 11 presenta un resumen de valores máximos, mínimos y promedio de la línea de tendencia de temperatura en LC (2017-2021) presentando máximos de temperatura entre los meses de junio a septiembre con un valor promedio de 26.8°C, y mínimos en el mes de enero con un promedio de 23.54°C. El valor máximo de temperatura en la línea de tendencia ocurrió el 27 de junio del 2019 con 27.54°C, contrario, el valor mínimo de temperatura ocurrió el 1 de enero del 2017 con 22.8°C.

Tabla 11 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la línea de tendencia de temperatura (°C) en la superficie del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

ID	Fecha máximos	T _{max} (°C)	ID	Fecha mínimos	T _{min} (°C)
A	15/07/2017	26.5204	A'	01/01/2017	22.8382
B	23/08/2018	25.9168	B'	24/01/2018	23.0179
C	27/06/2019	27.5437	C'	17/01/2019	23.6986
D	26/09/2020	27.0515	D'	09/01/2020	23.8315
E	27/07/2021	26.9706	E'	24/01/2021	23.6454
			F'	18/12/2021	24.3390
Promedio máximo		26.8006	Promedio mínimo		23.5418

Nota. Valores tomados de la línea de tendencia de temperatura de LC de la figura 26.

4.2.3. Clorofila-a

La figura 27 presenta las concentraciones de clorofila-a (chl-a) estimadas en el agua del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021. Este es un indicador de la cantidad de microalgas en suspensión y puede ser susceptible a eventos de florecimiento algal. En cada fecha se tomó el valor más frecuente (moda) de valores de chl-a medidos en unidades de miligramos por metro cubico. La figura muestra valores puntuales de las magnitudes y la línea de tendencia del conjunto de datos, con magnitudes que oscilan entre los 0.1 a 18.8 mg/m³.

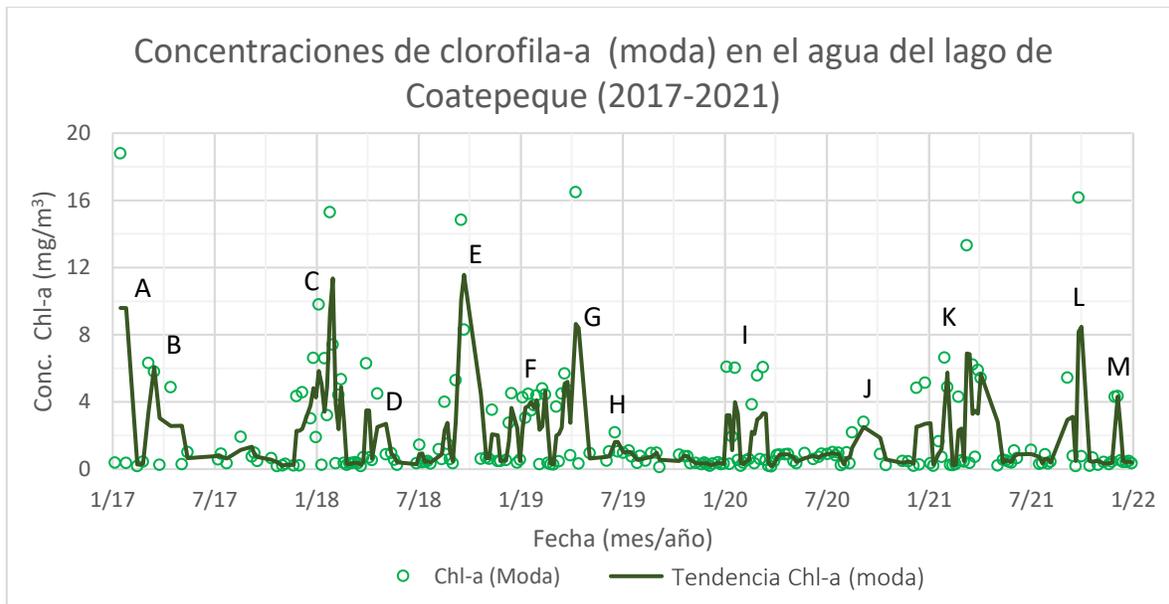


Figura 27 - Grafica del comportamiento de clorofila-a (mg/m³) en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

Durante los años 2017-2021, el agua del LC tiene un promedio general de clorofila-a de 1.99 mg/m³. La serie de tiempo de Chl-a presenta aumentos significativos por encima del promedio en múltiples fechas, con un total de eventos de 13 fechas o intervalos importantes, éstos son presentados en la tabla 12 como resumen de eventos anómalos de chl-a en LC.

Tabla 12 - Resumen de eventos de concentraciones anómalas de clorofila-a (mg/m^3) en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

ID	Fechas (dd/mm/yy)	Chl-a _{max} (mg/m^3)	ID	Fechas (dd/mm/yy)	Chl-a _{max} (mg/m^3)
A	15/01/17	18.8054	H	19/06/19	2.1799
B	06/03/17 – 15/04/17	6.3156	I	05/01/20 – 10/03/20	6.0918
C	26/11/17 – 14/02/18	15.2957	J	17/08/20 – 06/09/20	2.8206
D	31/03/18 – 20/04/18	6.2891	K	25/12/20 – 04/04/21	13.3322
E	18/08/18 – 22/09/18	14.8383	L	06/09/21 – 26/09/21	16.1684
F	11/12/18 – 14/02/19	4.8050	M	30/11/21 – 05/12/21	4.3532
G	06/03/19 – 10/04/19	16.4847			

Nota. Valores tomados de la figura 28 de la concentración de clorofila-a en el agua del Lago de Coatepeque.

4.2.4. Materia total suspendida

La figura 28 presenta las concentraciones de materia total suspendida (TSM) estimadas en el agua del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021. Esta es una medida estimada de la concentración de material particulado observado en el agua. Para cada fecha se tomó el valor más frecuente (moda) de valores de TSM medidos en unidades de gramos por metro cubico. La figura muestra valores puntuales de las magnitudes y la línea de tendencia del conjunto de datos, con magnitudes que oscilan entre 0 hasta $78.1 \text{ g}/\text{m}^3$.

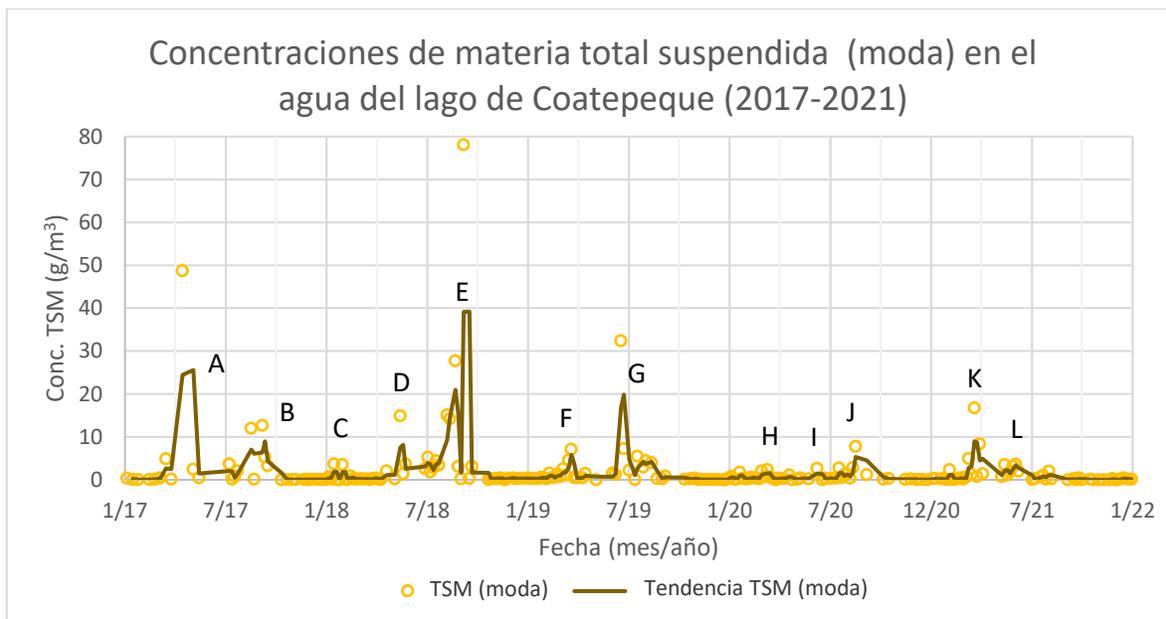


Figura 28 - Grafica de la concentración de materia total suspendida (g/m^3) en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

Durante el periodo estudiado, el agua de LC tiene en promedio un valor de materia total suspendida de $2.15 \text{ g}/\text{m}^3$. En múltiples episodios, la serie de temporal de TSM presenta aumentos significativos por encima del promedio, con un total de 12 eventos importantes expuestos en la tabla 14 como resumen de eventos de altas concentraciones de TSM en LC. El valor más alto ocurrió el 7 de septiembre del 2018 con una magnitud de $78.1 \text{ g}/\text{m}^3$.

Tabla 13 - Resumen de eventos de concentraciones anómalas de materia total suspendida (g/m^3) en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

ID	Fechas (dd/mm/yy)	Chl-a _{max} (g/m^3)	ID	Fechas (dd/mm/yy)	Chl-a _{max} (g/m^3)
A	13/03/17 – 05/05/17	4.8871	G	09/06/19 – 13/08/19	32.4117
B	09/07/17 – 17/09/17	12.6765	H	10/03/20	2.3426
C	15/01/18 – 30/01/18	3.6692	I	08/06/20	2.6596
D	20/04/18 – 25/05/18	14.8801	J	18/07/20 – 17/08/20	7.7873
E	29/06/18 – 22/09/18	78.1054	K	03/02/21 – 30/03/21	16.7611
F	06/03/19 – 21/03/19	7.1053	L	14/05/21 – 03/06/21	3.6258

Nota. Valores tomados de la figura 29 de la concentración de materia total suspendida en el agua del Lago de Coatepeque.

4.2.5. Vegetación flotante

Para el Lago de Coatepeque, la vegetación flotante obtenida mediante índices espectrales se refiere a algas y microalgas en suspensión o en la superficie del agua identificadas como señales verdes y marrones en el agua. Donde, a la geometría espectralmente identificada como agua, se le aplicó una clasificación del índice FAI (adimensional) de acuerdo con rango de magnitudes, entre baja, media y alta, con los valores límites de 0.008 (Siddiqui *et al.* 2019) y un valor propuesto de 0.13; sin embargo, estos límites deben ser ajustados a la dinámica de cada agua con base a datos. Para cada clasificación, se le asociará un porcentaje superficial del total del cuerpo de agua, que refleje la magnitud de distribución superficial de vegetación flotante.

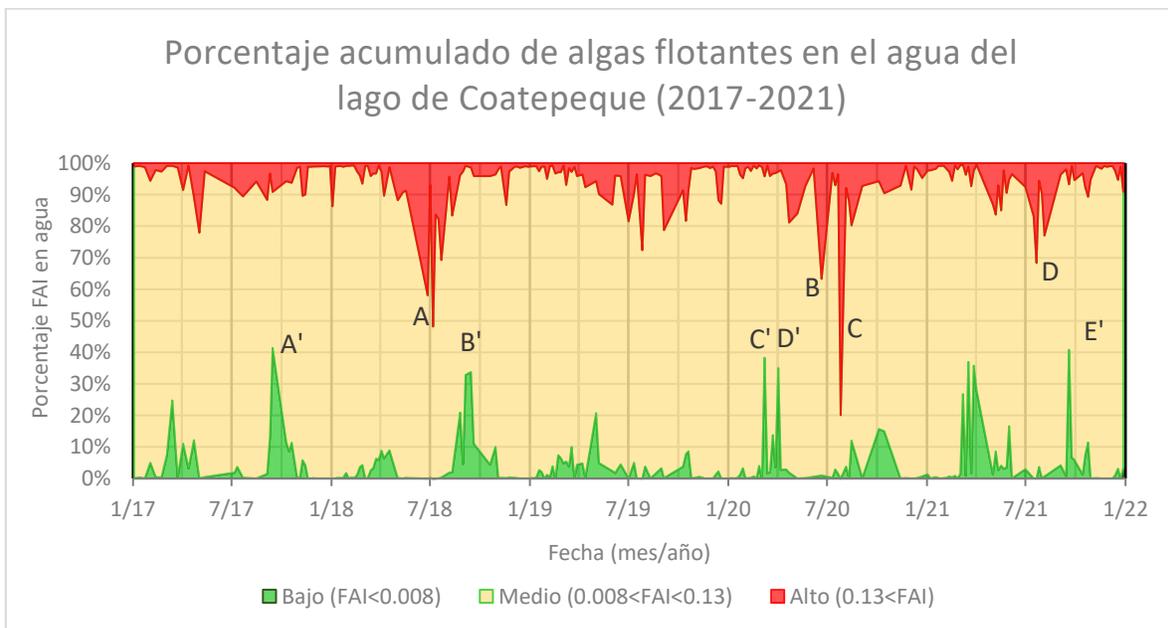


Figura 29 - Grafica temporal del porcentaje acumulado de cantidad de algas flotantes en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

La gráfica temporal (2017-2021) del porcentaje acumulado del índice FAI puede ser asociada a la cantidad de algas y microalgas presentes. El área verde corresponde al porcentaje de superficie con vegetación baja, la amarilla a vegetación media y la roja a

vegetación alta. La mayor parte del periodo la superficie del LC tiene valor FAI de vegetación media, así como reducidas superficies con valores bajos (verde) y altos (rojo) de vegetación flotante. Sin embargo, existen cuatro periodos anómalos con superficies mayores al 30% del cuerpo de agua con FAI altos, y cinco periodos anómalos de aumento de superficie de FAI bajo mostrados en la tabla 14.

Tabla 14 - Resumen de valores altos y bajos de índice de algas flotantes en la superficie del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

Periodos anómalos de FAI alto			Periodos anómalos de FAI bajo		
ID	Fechas	Porcentaje	ID	Fechas	Porcentaje
A	25/05/18 – 13/08/18	51.88	A'	12/09/17 – 12/10/17	41.41
B	23/06/20	36.75	B'	28/08/18 – 17/09/18	33.70
C	28/07/20	79.91	C'	10/03/20	38.30
D	23/07/21	31.64	D'	04/04/20	35.03
			E'	10/03/21 – 04/04/21	27.83
			F'	21/09/21	40.79

Nota. Valores tomados de la gráfica 27 de la vegetación flotante en el agua del Lago de Coatepeque.

4.2.6. Evolución del color del agua

Para estudiar la evolución temporal del color en el Lago de Coatepeque fue necesario sintetizar los valores de reflectancia con el fin de obtener un valor mensual. Se calculó el promedio de todos los píxeles asociados espectralmente al agua para cada banda de reflectancia de los colores rojo (nm), verde (nm) y azul (nm). La serie de cada color fue promediada en intervalos mensuales desde enero del 2017 hasta diciembre del 2021, obteniendo tres valores RGB por mes; asignando la combinación de colores correspondiente a cada cuadrícula mensual en la figura 30 se obtuvo una representación visual que refleja el cambio de color en el tiempo.

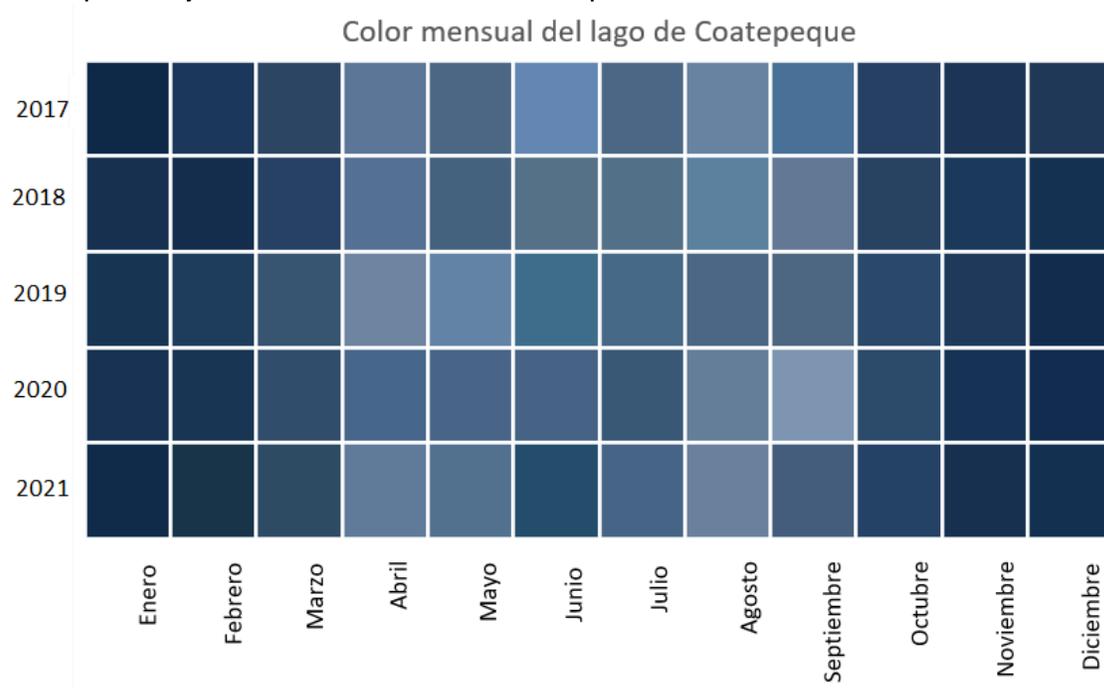


Figura 30 - Secuencia del color mensual en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

4.3. Estimación de parámetros satelitales del Embalse Cerrón Grande

4.3.1. Espejo de agua

Los valores de la superficie del espejo de agua del Embalse Cerrón Grande (ECG) fueron obtenidos a partir de la selección de las mejores imágenes S2-MSI, con poca cubierta nubosa. Debido a la amplia superficie del cuerpo de agua en forma de "L" invertida y elongada del ECG pueden existir diversos procesos en distintos puntos al mismo tiempo, afectando la señal de reflectancia del agua. En ECG presenta superficie cubierta por jacinto de agua, capas densas de microalgas flotando, alta carga de sedimentos descarga de los ríos, entre otros factores. Adicionalmente, efectos del oleaje en la superficie del agua pueden llegar a reflejar gran cantidad de luz, así como reflexión directa de la luz solar provocando zonas blancas en el agua, excluidas espectralmente del agua.

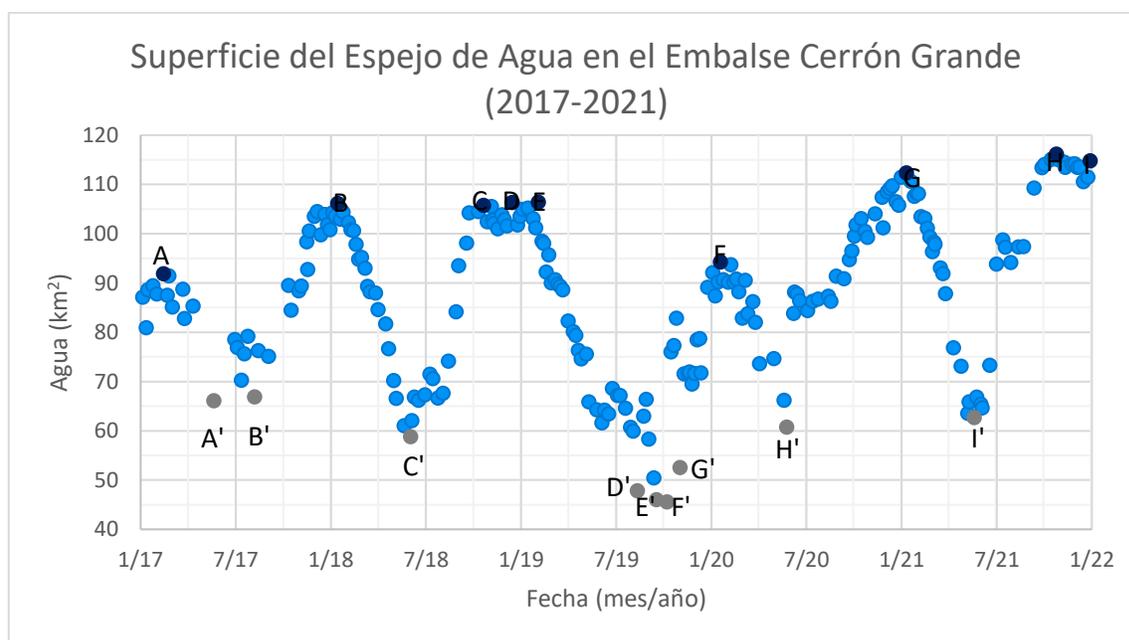


Figura 31 - Grafica temporal de la superficie del espejo de agua (km²) del embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

La superficie del agua fue obtenida de pixeles con valores de índice SWM<0.8, el conteo global resulta en el dato del espejo de agua. Zonas con vegetación densa y aguas con excesiva cantidad de sedimentos generan señales espectrales diferentes al agua. Para la figura 31, se utilizaron 225 imágenes satelitales del ECG recopiladas en el periodo desde el 2017 hasta el año 2021.

La tabla 15 presenta los valores máximos y mínimos de kilómetros cuadrados (km²) de agua visible de ECG. El valor de superficie más grande sensado espectralmente ocurrió el 26 de octubre del 2021 con 116.11 km², contrario, el valor de superficie mínimo identificado ocurrió el 9 de octubre con 45.54 km².

Tabla 15 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la superficie (km²) del espejo de agua del embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

ID	Fecha máximos	Máximo (km ²)	ID	Fecha mínimos	Mínimos (km ²)
A	14/02/17	91.8614	A'	22/05/17	66.0979
B	15/01/18	106.0787	B'	08/08/17	66.8451
C	22/10/18	105.6962	C'	04/06/18	58.8451
D	16/12/18	106.3318	D'	13/08/19	47.8144
E	04/02/19	106.3647	E'	19/09/19	45.9991
F	20/01/20	94.2386	F'	09/10/19	45.5410
G	11/01/21	112.3222	G'	03/11/19	52.4953
H	26/10/21	116.1053	H'	26/05/20	60.7398
I	30/12/21	114.7881	I'	21/05/21	62.6560

Nota. Valores tomados de la gráfica 31 de la superficie del espejo de agua del ECG.

4.3.2. Temperatura

La temperatura (°C) de la superficie del agua en el Embalse Cerrón Grande fue obtenida a partir de las imágenes S3-SLSTR, preseleccionadas con una cubierta nubosa no mayor al 60% en la zona de estudio. La figura 32 fue generada con datos de 659 imágenes, con los pixeles que cumplieron las condiciones nubosidad, valor de NDVI, cubierta de agua (biome) y excluyendo valores atípicos. La amplia dispersión de las magnitudes de los valores puede ser debida al estado del clima, lluvia, viento, entre múltiples factores. Por tanto, se elaboró una línea de tendencia de la temperatura a partir de los datos.

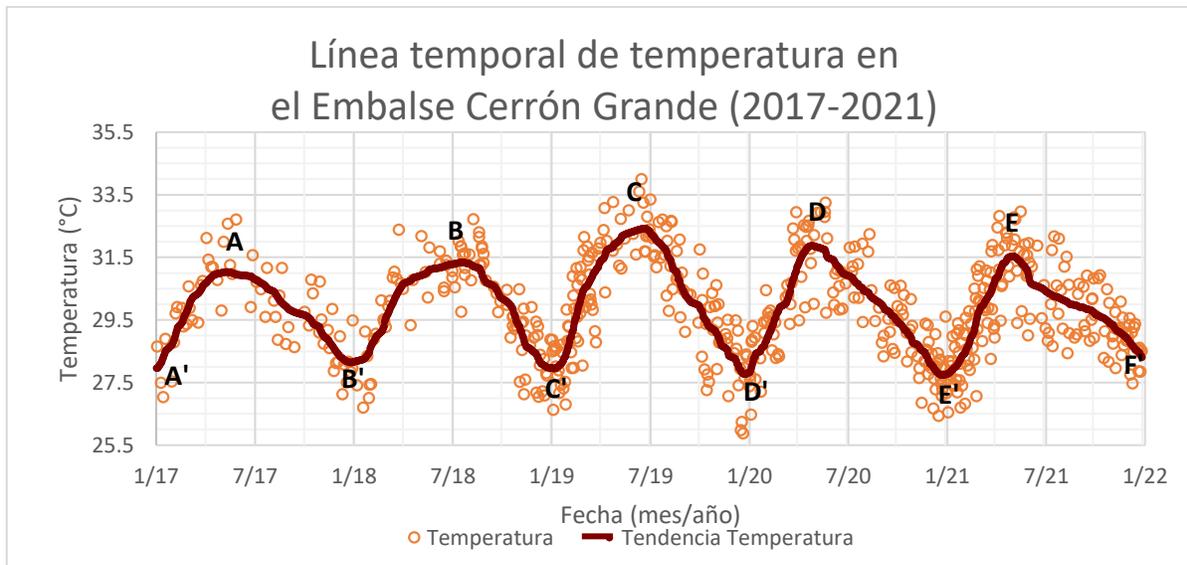


Figura 32 - Grafica temporal y línea de tendencia de temperatura (°C) del embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

La tabla 17 presenta un resumen de valores máximos, mínimos y promedio de la línea de tendencia de temperatura en ECG (2017-2021) presentando máximos de temperatura entre los meses de abril y julio con un valor promedio de 31.64°C, y mínimos los meses de diciembre y enero con un promedio de 27.98°C. El valor máximo de la serie ocurrió el 25

de junio del 2019 con 32.42°C, y el valor mínimo de la serie ocurrió el 25 de diciembre del 2020 con 27.74°C.

Tabla 16 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la línea de tendencia de temperatura (°C) en la superficie del Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

ID	Fecha máximos	T _{max} (°C)	ID	Fecha mínimos	T _{min} (°C)
A	15/05/2017	31.0346	A'	01/01/2017	27.9663
B	21/07/2018	31.3467	B'	28/12/2017	28.1443
C	25/06/2019	32.4242	C'	07/01/2019	27.9587
D	28/04/2020	31.8725	D'	26/12/2019	27.7747
E	05/05/2021	31.5325	E'	25/12/2020	27.7435
			F'	31/12/2021	28.3145
Promedio máximo		31.6421	Promedio mínimo		27.9837

Nota. Valores tomados de la línea de tendencia de temperatura del ECG en la figura 32.

4.3.3. Clorofila-a

La concentración de clorofila-a (chl-a) estimadas en el agua del Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021 es un indicador de la cantidad de microalgas presentes en el agua, potencialmente útil para el estudio de eventos de florecimiento algal. En cada fecha se tomó el valor promedio de los valores de chl-a medidos en unidades de miligramos por metro cubico. La figura 33 muestra valores puntuales de las magnitudes y la línea de tendencia del conjunto de datos, con magnitudes que oscilan entre los 0.1 a 26.32 mg/m³.

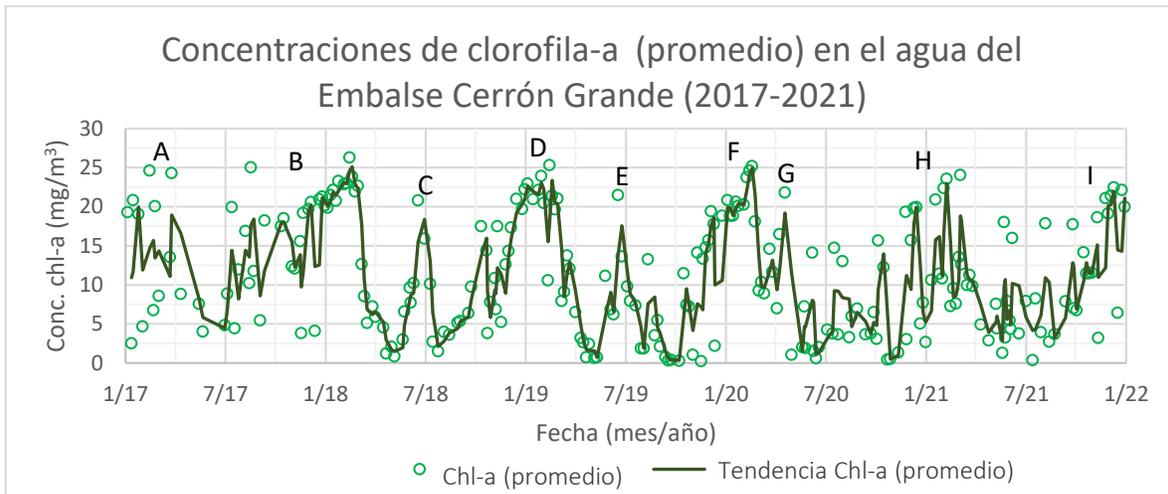


Figura 33 - Grafica del comportamiento de clorofila-a (mg/m³) en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

La serie de temporal de clorofila-a del ECG presenta múltiples periodos de altas concentraciones de Chl-a por encima del valor promedio de la serie de 11.48 mg/m³, entre estos existen periodos de bajas concentraciones. Por tanto, se encontraron 9 fechas o intervalos importantes, éstos son presentados en la tabla 18 como resumen de eventos anómalos de chl-a en LC. El valor más alto fue registrado el 14 de febrero del 2018 con una magnitud de 26.32 mg/m³.

Tabla 17 - Resumen de eventos de concentraciones anómalas de clorofila-a (mg/m^3) en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

ID	Fechas (dd/mm/yy)	Chl-a _{max} (mg/m^3)	ID	Fechas (dd/mm/yy)	Chl-a _{max} (mg/m^3)
A	05/01/17 – 26/03/17	24.6230	F	11/11/19 – 24/02/20	25.2054
B	14/07/17 – 08/03/18	26.3210	G	22/03/20 – 19/04/20	21.8234
C	11/06/18 – 11/07/18	20.8288	H	25/11/20 – 22/03/21	24.0506
D	12/10/18 – 23/03/19	25.3319	I	26/09/21 – 30/12/21	22.4737
E	27/05/19 – 26/06/19	21.5028			

Nota. Valores tomados de la figura 34 de la concentración de clorofila-a en el agua del ECG.

4.3.4. Materia total suspendida

La materia total suspendida (TSM) estimada en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021 muestra concentraciones significativamente altas. La serie temporal mostrada en la figura 35 fue elaborada con los promedios de TSM por cada fecha con valores que oscilan entre 0.1 hasta 21,406.21 g/m^3 , adicionalmente se muestra la línea de tendencia de la serie de datos.

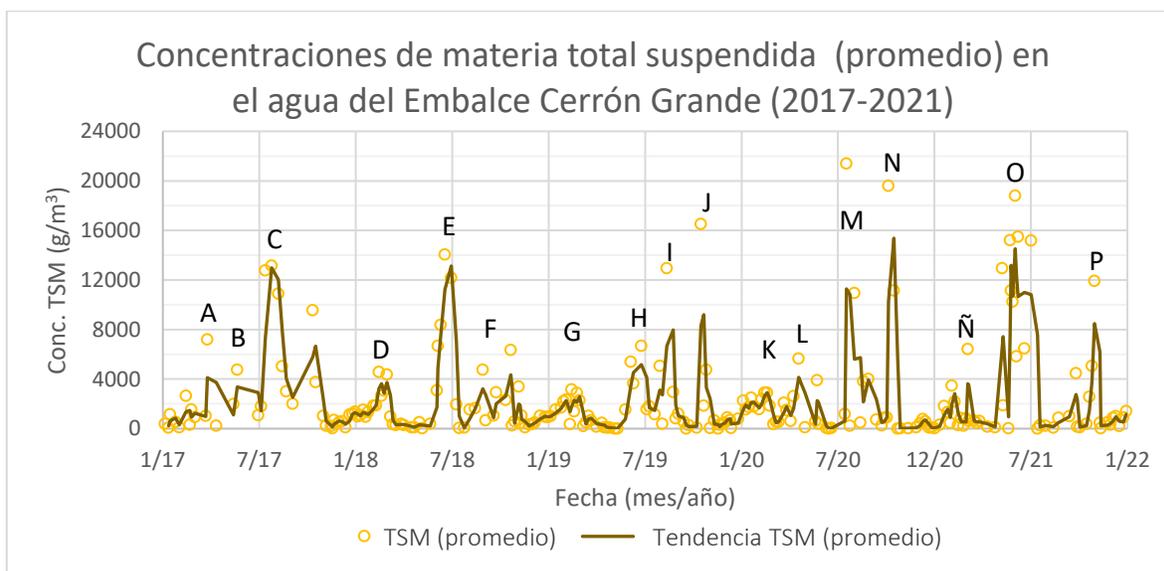


Figura 34 - Grafica de la concentración de materia total suspendida (g/m^3) en el embalse Cerrón Grande (2017-2021).

Para definir intervalos o periodos de altas concentraciones de TSM se definió el promedio del total de valores como límite, siendo de 2488.79 g/m^3 en la serie temporal de ECG. En múltiples episodios las concentraciones superaban este límite, encontrando eventos importantes expuestos en la tabla 19 como resumen de eventos de altas concentraciones de TSM. Es importante aclarar que las estimaciones son resultados del procesador C2RCC a partir de redes neuronales previamente entrenadas con datos globales, y que la dinámica del ECG es compleja con intensa actividad algal y de sedimentos, por lo que las magnitudes

de TSM pueden no ser representativas, sin embargo, la tendencia del comportamiento si puede ser representativa.

Tabla 18 - Resumen de eventos de concentraciones anómalas de materia total suspendida (g/m^3) en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

ID	Fechas (dd/mm/yy)	Chl-a _{max} (g/m^3)	ID	Fechas (dd/mm/yy)	Chl-a _{max} (g/m^3)
A	26/03/17	7,196.20	J	17/10/19 – 27/10/19	16,523.90
B	22/05/17	4,760.80	K	20/01/20 – 19/02/20	2,915.76
C	14/07/17 – 17/10/17	13,145.85	L	09/04/20 – 24/05/20	5,643.79
D	19/02/18 – 01/03/18	4,575.46	M	15/07/20 – 29/08/20	21,406.21
E	04/06/18 – 11/07/18	14,064.43	N	03/10/20 – 23/10/20	19,603.90
F	30/08/18 – 06/11/18	6,357.21	Ñ	03/02/21 – 05/03/21	6,422.60
G	04/02/19 – 01/03/19	3,173.84	O	11/05/21 – 03/07/21	18,807.90
H	11/06/19 – 11/07/19	6,681.14	P	26/09/21 – 10/11/21	11,925.93
I	31/07/19 – 25/08/19	12,959.74			

Nota. Valores tomados de la figura 35 de la concentración de materia total suspendida en el agua del Embalse Cerrón Grande.

4.3.5. Vegetación flotante

El índice de algas flotantes (FAI) permite identificar espectralmente señal de vegetación flotante en el agua. Estos fueron clasificados en 3 rangos, agrupados como vegetación baja ($x < 0.008$), media ($0.008 \leq x \leq 0.13$) y alta ($x > 0.13$); la distribución de los pixeles FAI en la geometría del espejo del agua fue cuantificada y asignado un porcentaje de acuerdo con la superficie correspondiente. La figura 35 se elaboró con el porcentaje acumulado de las clases FAI, donde el rojo corresponde a los valores altos, los verdes a los bajos y amarillo a los valores medios.

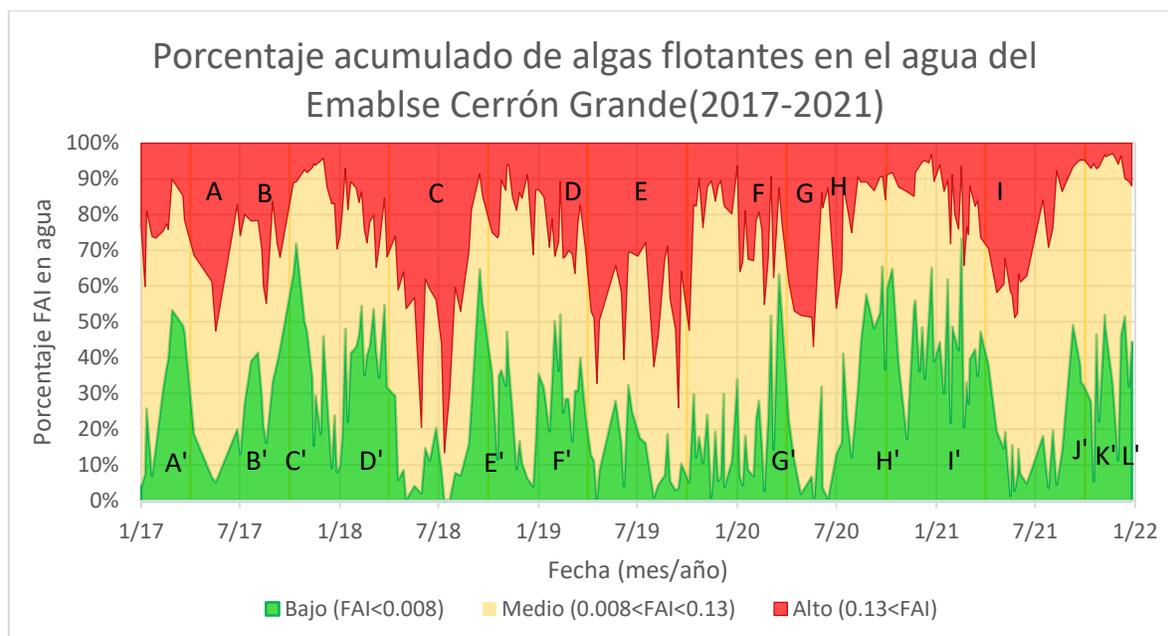


Figura 35 - Grafica temporal y línea de tendencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

Es importante mencionar que se ha considerado únicamente la señal espectralmente percibida como agua. Durante el periodo 2017-2021 en el agua del ECG se identificó épocas con altos valores FAI a finales de abril, en mayo y principios de junio, así como en agosto. Contrariamente, los periodos con FAI bajos ocurren desde septiembre hasta marzo. La tabla 19 presenta un resumen de las fechas con periodos de altos y bajos valores FAI, donde el evento donde se registró FAI más alto ocurrió entre el 2 de abril y el 9 de octubre del 2019 con una cobertura del 74.0% del cuerpo de agua.

Tabla 19 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la línea de tendencia de temperatura (°C) en la superficie del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

Periodos anómalos altos			Periodos anómalos bajos		
ID	Fechas	Porcentaje	ID	Fechas	Porcentaje
A	12/04/17 – 15/6/17	55.6	A'	14/02/17 – 01/04/17	53.3
B	15/08/17 – 01/09/17	45	B'	14/07/17 – 15/08/17	41.4
C	02/04/18 – 30/08/18	86.6	C'	04/09/17 – 21/11/17	71.9
D	19/02/19 – 13/03/19	36.4	D'	15/01/18 – 17/04/18	54.7
E	02/04/19 – 09/10/19	74.0	E'	04/09/18 – 18/11/18	64.7
F	10/01/20 – 12/03/20	45.2	F'	05/01/19 – 02/04/19	52.0
G	09/04/20 – 01/06/20	56.9	G'	07/03/20 – 09/04/20	62.4
H	01/07/20 – 15/07/20	46.3	H'	14/08/20 – 28/10/20	65.5
I	11/04/21 – 01/07/21	48.8	I'	25/11/20 – 11/04/21	73.3
			J'	05/09/21 – 16/10/21	49.1
			K'	31/10/21 – 25/11/21	51.9
			L'	10/12/21 – 30/12/21	51.5

Nota. Valores tomados de la figura 35 de la vegetación flotante en el agua del embalse Cerrón Grande.

4.3.6. Color

Para estudiar la evolución temporal del color en el Embalse Cerrón Grande fue necesario sintetizar los valores de reflectancia con el fin de obtener un valor mensual. Se calculó el promedio de todos los píxeles asociados espectralmente al agua para cada banda de reflectancia de los colores rojo (nm), verde (nm) y azul (nm); la superficie cubierta por jacinto de agua y las zonas con densa concentración de microalgas reflejaban señales de vegetación diferentes al agua, estos píxeles fueron excluidos. La serie de cada color fue promediada en intervalos mensuales desde enero del 2017 hasta diciembre del 2021, obteniendo tres valores RGB por mes; asignando la combinación de colores correspondiente a cada cuadrícula mensual en la figura 36 se obtuvo una representación visual que refleja el cambio de color en el tiempo.

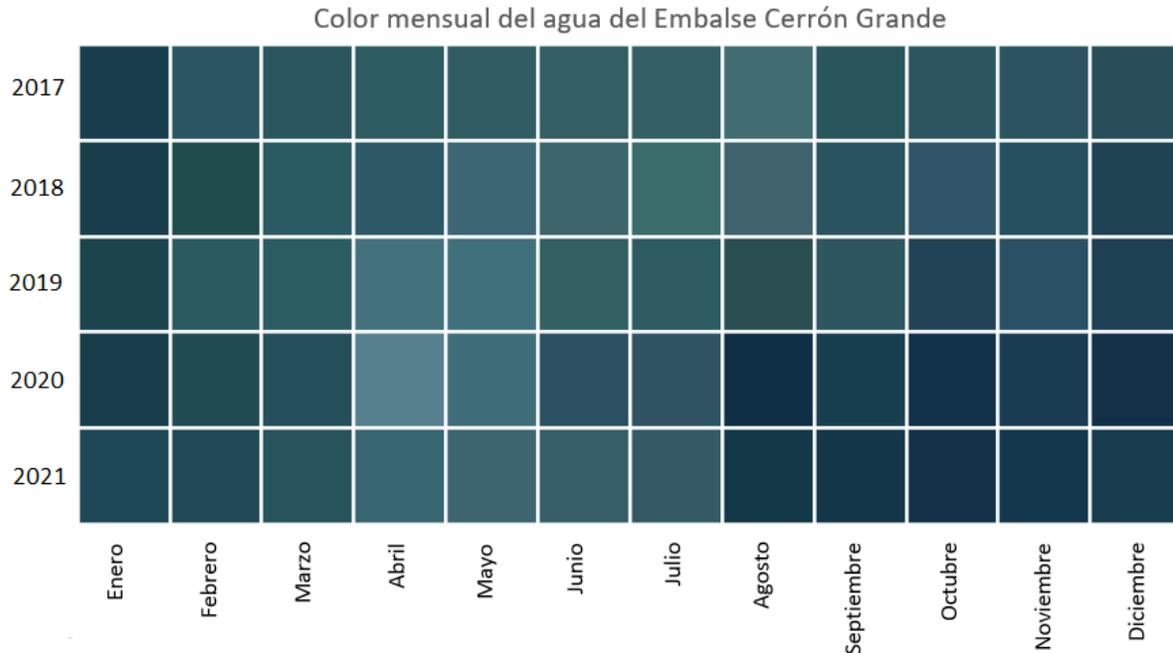


Figura 36 - Secuencia del color mensual en el embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

4.4. Resultados de correlación de parámetros satelitales con registros de datos

Con el objetivo de evaluar los parámetros satelitales estimados, se utilizaron registros de parámetros medidos *in situ* en el agua del Lago de Coatepeque y en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021 para generar gráficas de comparación. Es importante destacar superior cantidad de datos satelitales respecto a las mediciones *in situ*. También, el valor de los parámetros satelitales estimados está determinado por las condiciones a las que los cuerpos de agua están durante el sensado de los satélites; en contraste, las mediciones *in situ* están asociadas a un punto específico en el cuerpo de agua y a las condiciones particulares de la hora de medición.

4.4.1. Lago de Coatepeque

Para identificar correlación entre las magnitudes de los parámetros satelitales estimados y registros de mediciones *in situ* en LC los datos fueron sobrepuestos en los gráficos de las series temporales. Para el periodo 2017-2021 se obtuvieron 25 registros de temperatura (°C) y profundidad de disco Secchi (cm), y 24 de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), que se distribuyen irregularmente en la serie de datos, con mayor frecuencia en entre julio del 2017 y noviembre del 2018, y entre octubre del 2020 y julio del 2021.

La figura 37 fue realizada a partir de 659 datos de temperatura satelital, la línea de tendencia satelital y 25 registros de temperatura, obteniendo 26.36 veces más datos por medio de la teledetección. Las figuras 38 y 39 tienen como base común 226 datos de clorofila satelital (mg/m^3) y su línea de tendencia sobre las cuales se ha sobrepuesto 25 registros de profundidad de disco Secchi (cm) y 24 de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) respectivamente,

obteniendo 9 veces más información satelital respecto a las medidas *in situ*. De forma similar, las figuras 40 y 41 tienen como base común 226 datos de materia total suspendida (g/m^3) y su línea de tendencia sobre las cuales se ha sobrepuesto 25 registros de profundidad de disco Secchi (cm) y 24 de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) respectivamente.

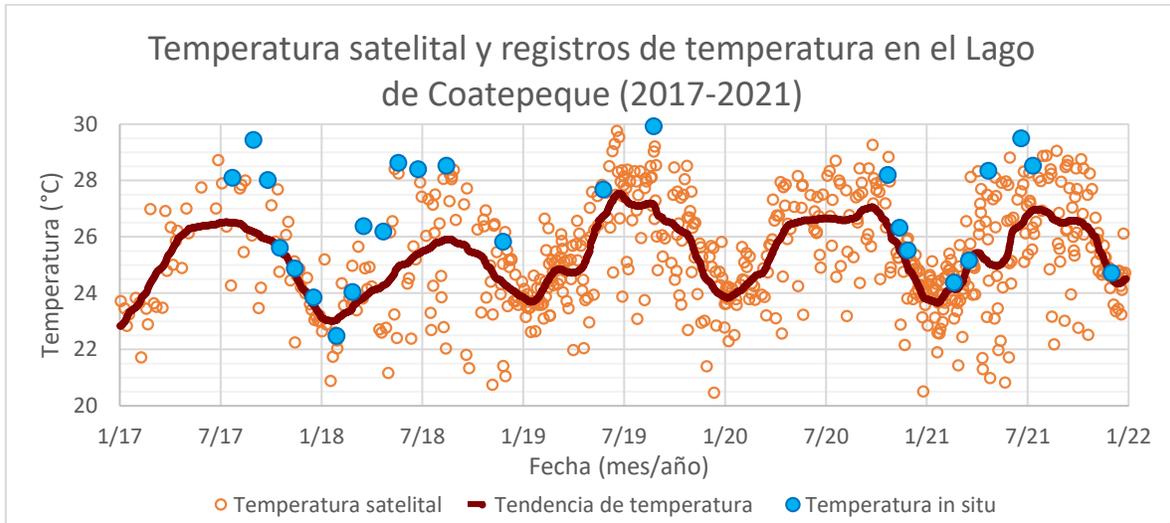


Figura 37 - Gráfica de correlación entre temperatura satelital y registro de temperatura medida *in situ* en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

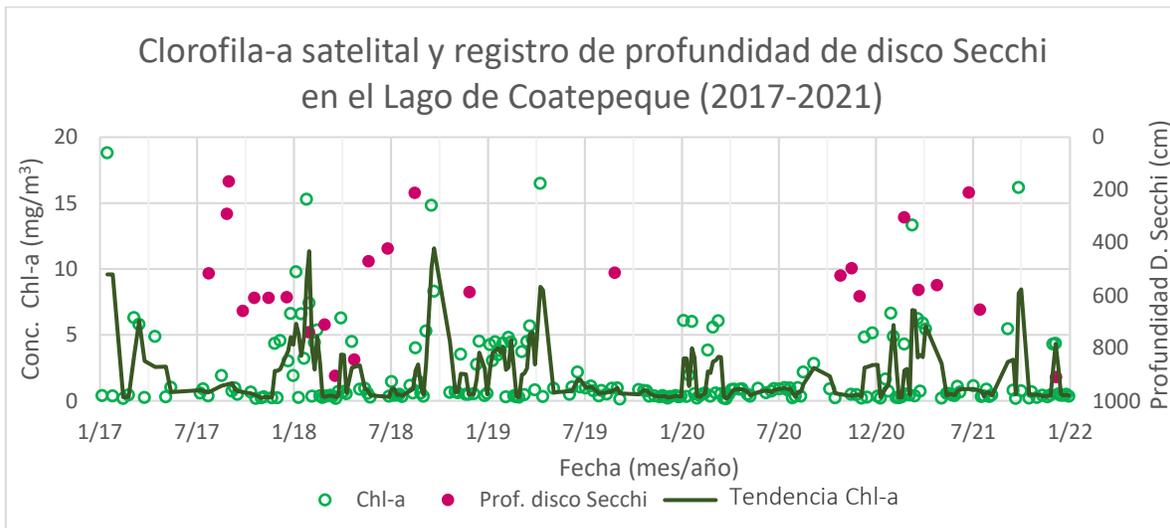


Figura 38 - Gráfica de correlación entre clorofila-a satelital y registro de profundidad de disco Secchi medida *in situ* en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

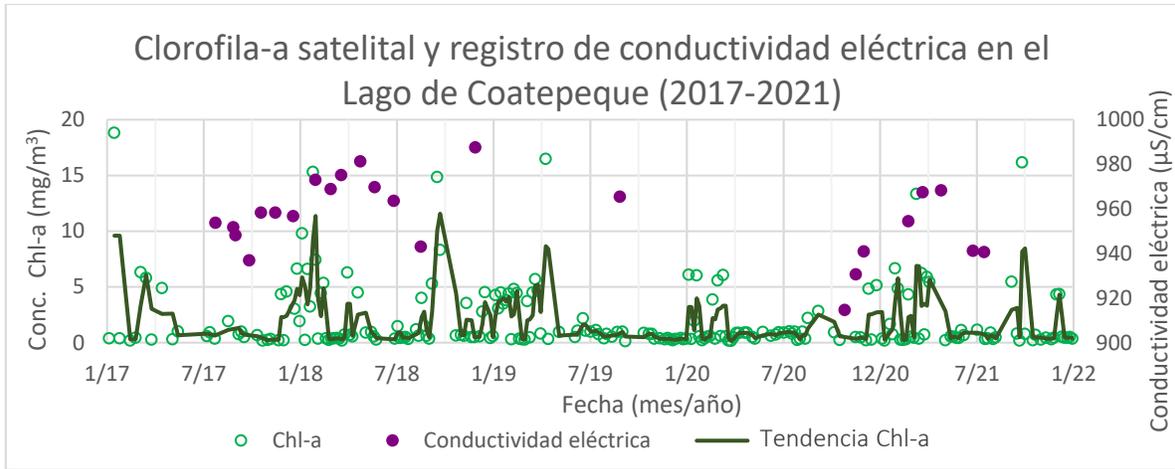


Figura 39 - Gráfica de correlación entre clorofila-a satelital y registro de conductividad eléctrica medida *in situ* en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

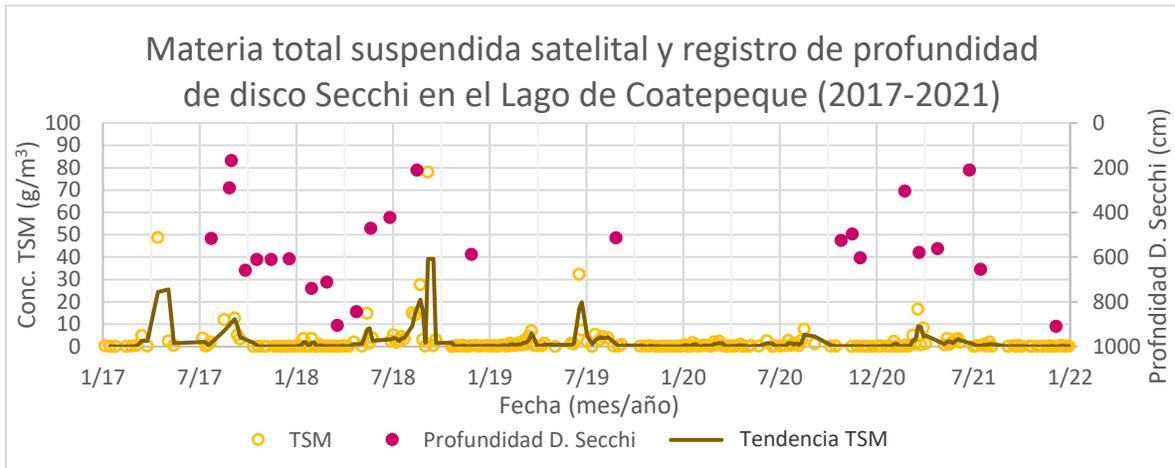


Figura 40 - Gráfica de correlación entre materia total suspendida satelital y registro de profundidad de disco Secchi medida *in situ* en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

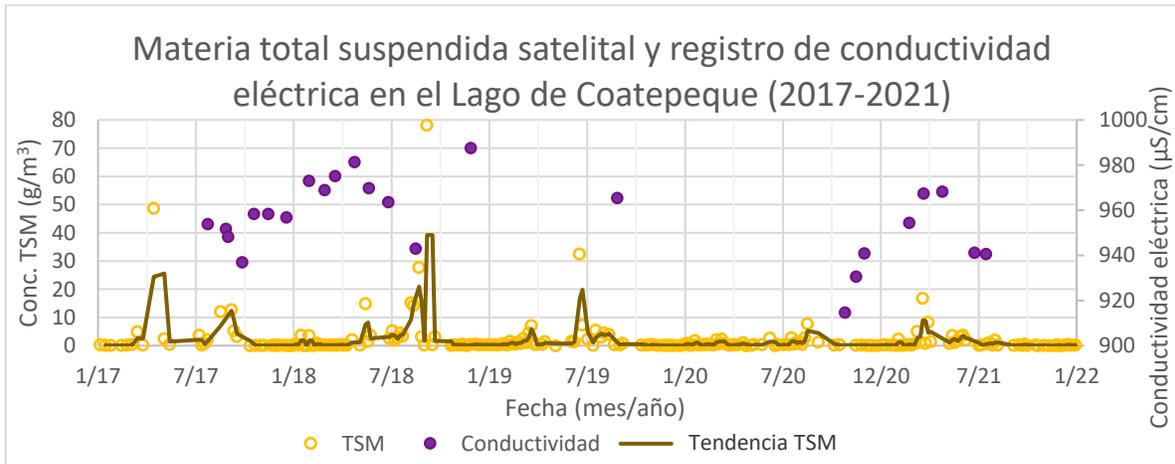


Figura 41 - Gráfica de correlación entre materia total suspendida satelital y registro de conductividad eléctrica medida *in situ* en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

4.4.2. Embalse Cerrón Grande

Con el objetivo de identificar correlación entre los parámetros satelitales estimados y registros de mediciones *in situ* en el ECG fueron superpuestos en los gráficos de las series temporales. Para el periodo 2017-2021 se obtuvieron 21 registros de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y profundidad de disco Secchi (cm), 20 registros de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y 12 de clorofila-a (mg/m^3). Estos se distribuyen entre octubre del 2018 y febrero del 2020, fuera de este periodo no se encontraron registros.

La figura 42 muestra la temperatura satelital ($^{\circ}\text{C}$), la línea de tendencia satelital y los 25 registros de temperatura desde junio del 2018 hasta junio del 2020. Considerando el periodo global de los datos (2017-2021), se obtuvieron 612 valores de temperatura satelital contra 25 registros *in situ*, resultando 24.48 veces más con el uso de la teledetección. La clorofila-a y la materia total suspendida fue correlacionada con la profundidad de disco Secchi y la conductividad eléctrica. La figura 43 muestra los valores de clorofila satelital y la chl-a medida *in situ*.

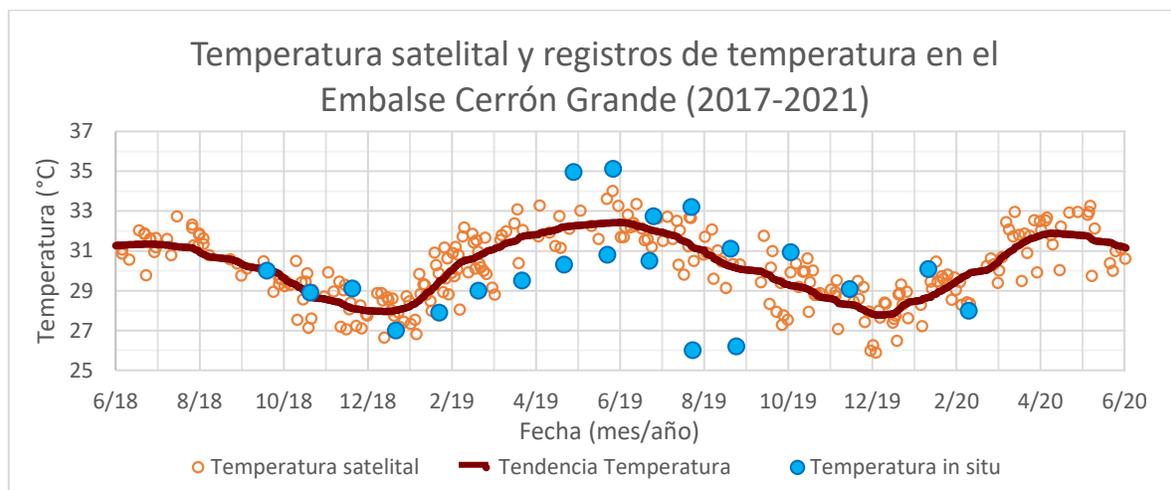


Figura 42 - Gráfica de correlación entre temperatura satelital y registro de temperatura medida *in situ* en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).

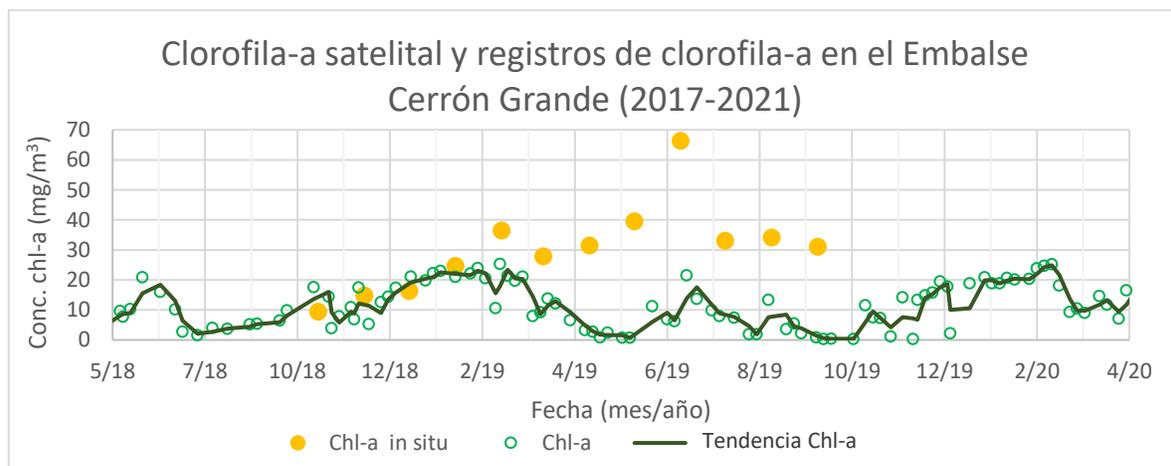


Figura 43 - Gráfica de correlación entre clorofila-a satelital y registros medidos *in situ* en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).

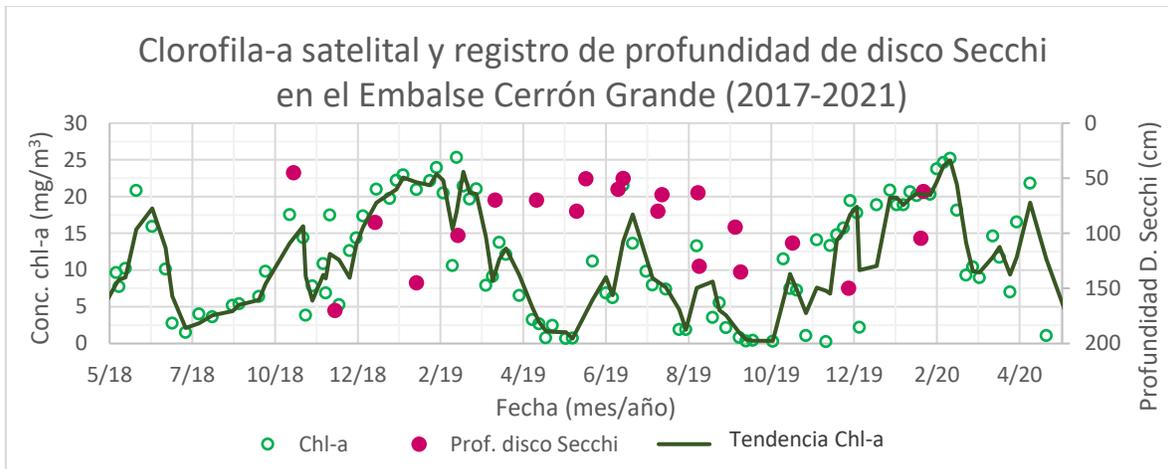


Figura 44 - Gráfica de correlación entre clorofila-a y registros de profundidad del disco Secchi en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).

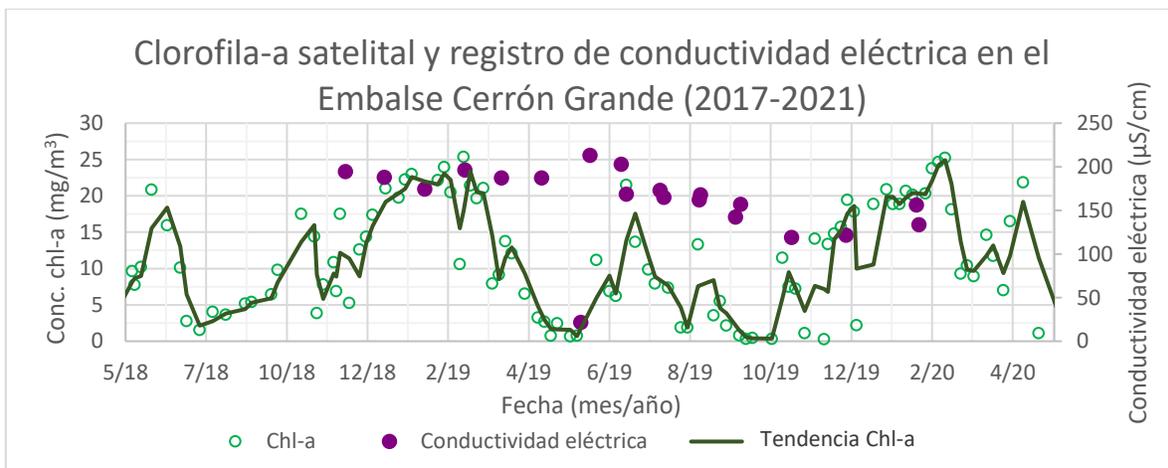


Figura 45 - Gráfica de correlación entre clorofila-a y registros de conductividad eléctrica en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).

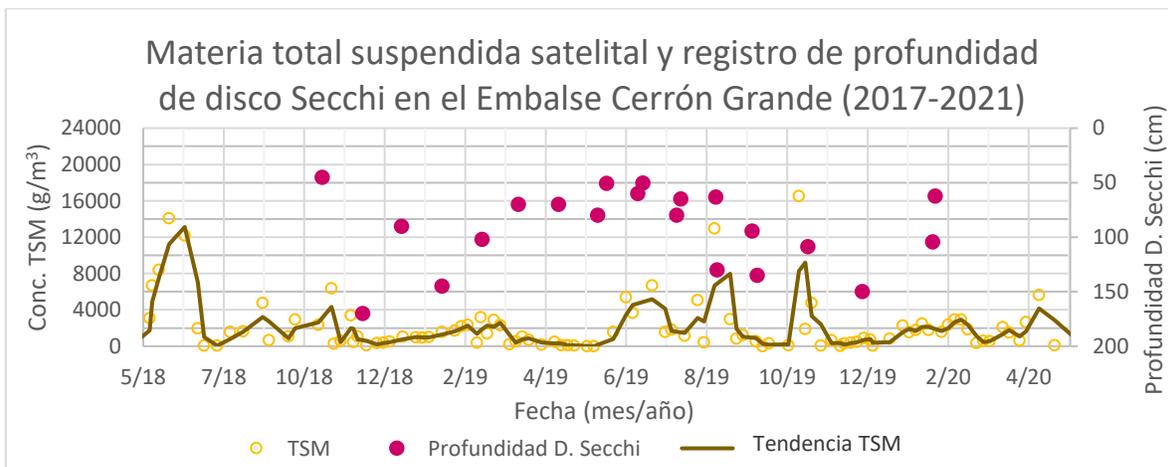


Figura 46 - Gráfica de correlación entre la materia total suspendida y registros de profundidad del disco Secchi en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).

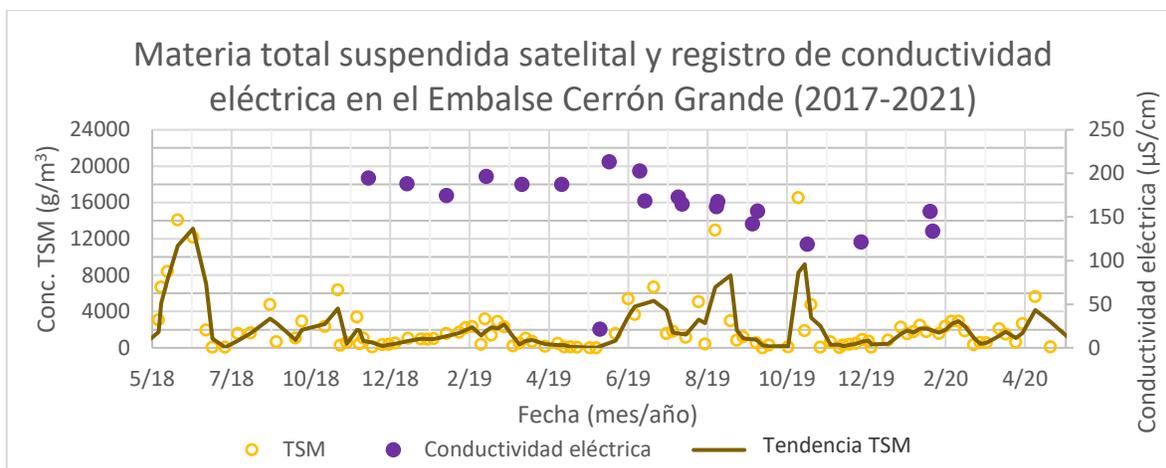


Figura 47 - Gráfica de correlación entre la materia total suspendida y registros de conductividad eléctrica en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).

4.5. Resultados de correlación temporal entre parámetros satelitales

Con el objetivo de analizar y caracterizar la dinámica de los cuerpos de agua a partir de los productos de imágenes satelitales se consolidó los resultados en una misma escala de tiempo, se pretende identificar patrones y correlaciones entre crecimientos, decrementos y registros de eventos importantes y determinar si la frecuencia de adquisición de datos es sensible a los fenómenos de los cuerpos lenticos. Los consolidados se componen de las gráficas de superficie del espejo de agua (km²), temperatura (°C), índice de algas flotantes (FAI, adimensional), clorofila-a (mg/m³), materia total suspendida (TSM, g/m³) y color del agua, que comparten una misma escala temporal.

La figura 48 presenta los 6 resultados de las estimaciones satelitales para el Lago de Coatepeque durante el periodo 2017-2021, con una misma escala temporal marcada por ejes cada 3 y 6 meses. La figura 49 presenta los 6 resultados de las estimaciones satelitales para el Embalse Cerrón Grande durante el periodo 2017-2021, con una misma escala temporal marcada por ejes cada 3 y 6 meses. La figura 50 es un resumen temporal de los eventos máximos y mínimos identificados satelital mente durante el periodo 2017-2021 en ambos cuerpos de agua, incluye las fechas de los registros de informes realizados e informes.

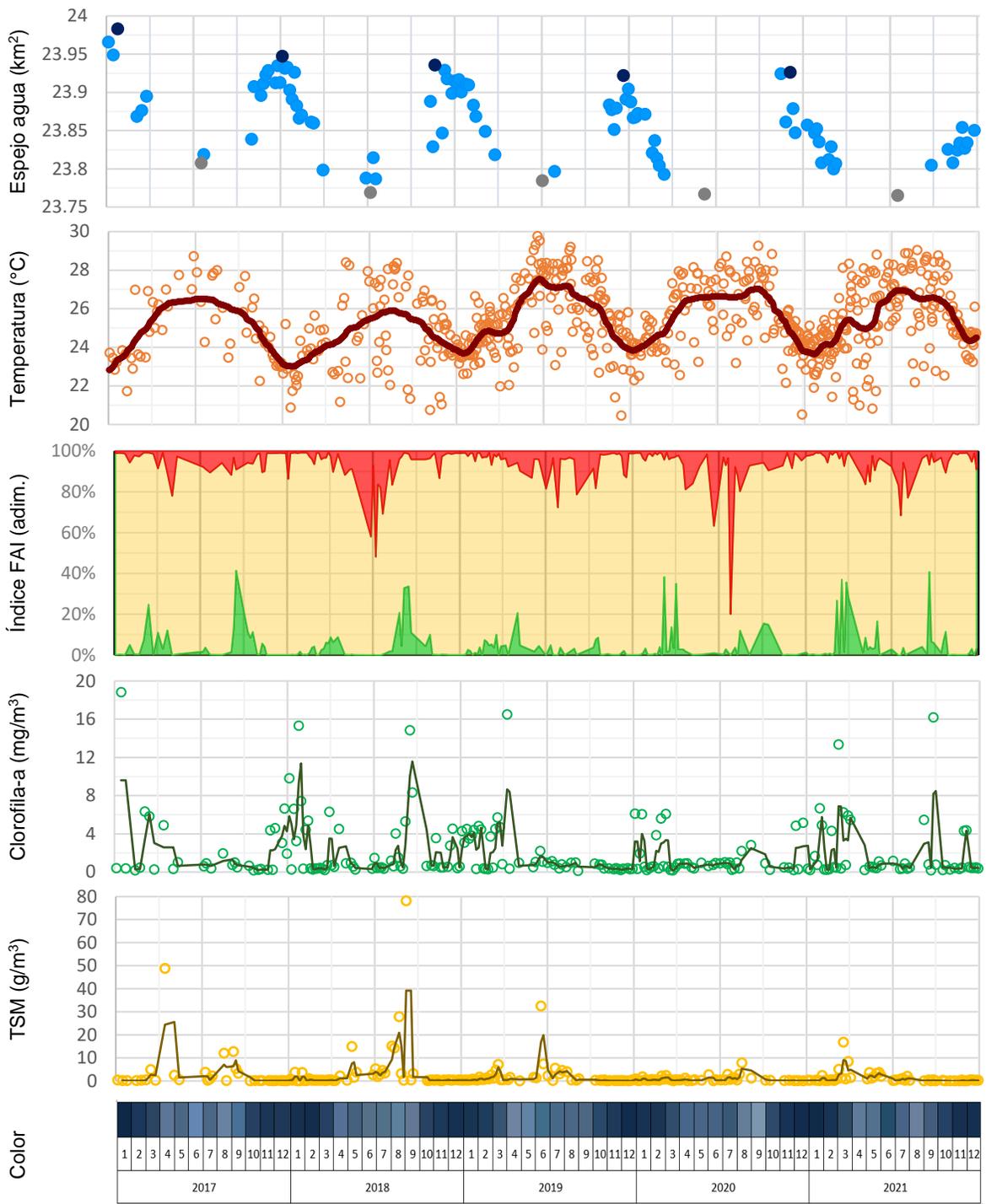


Figura 48 - Consolidado de gráficas resultado de estimaciones satelitales en el Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

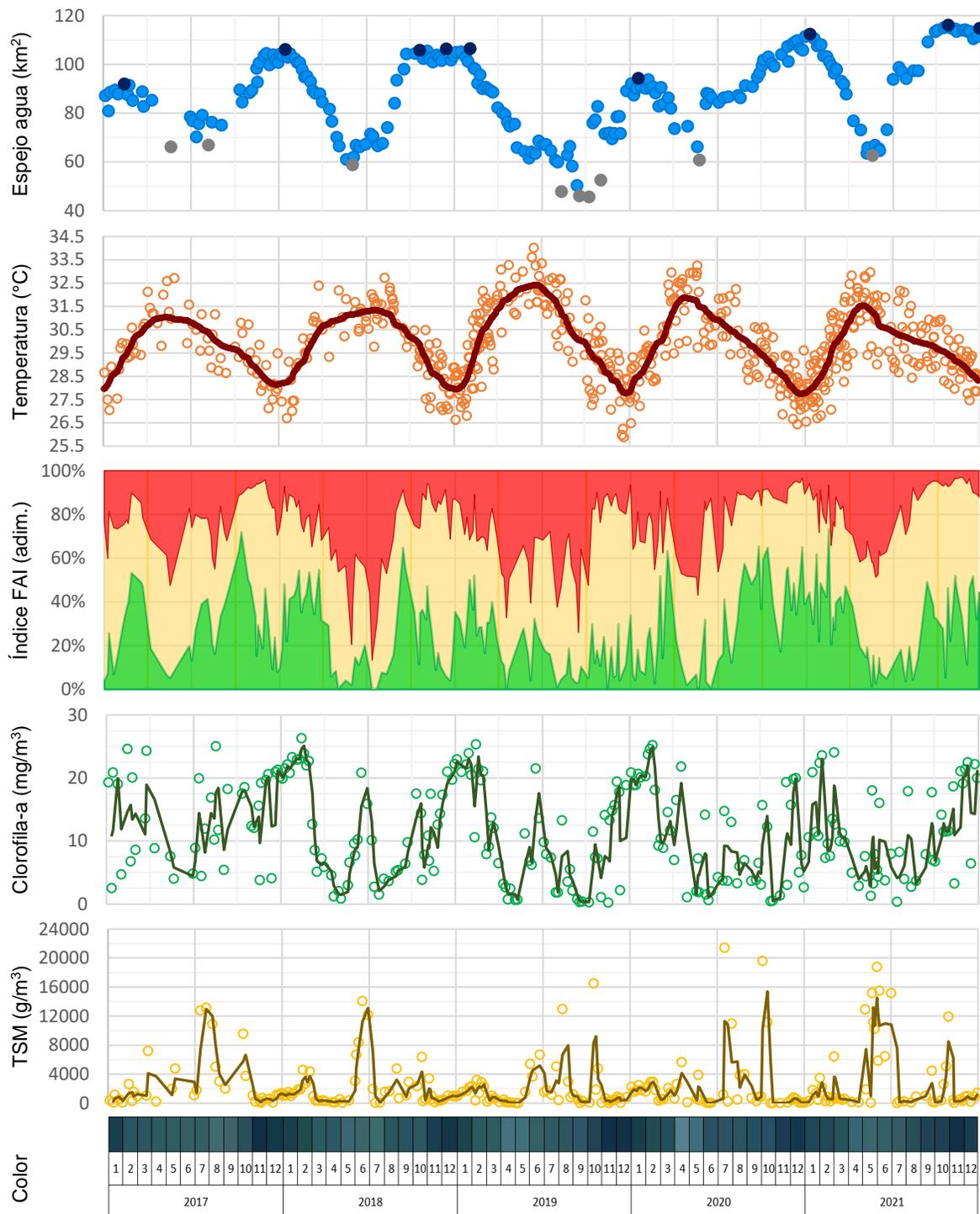
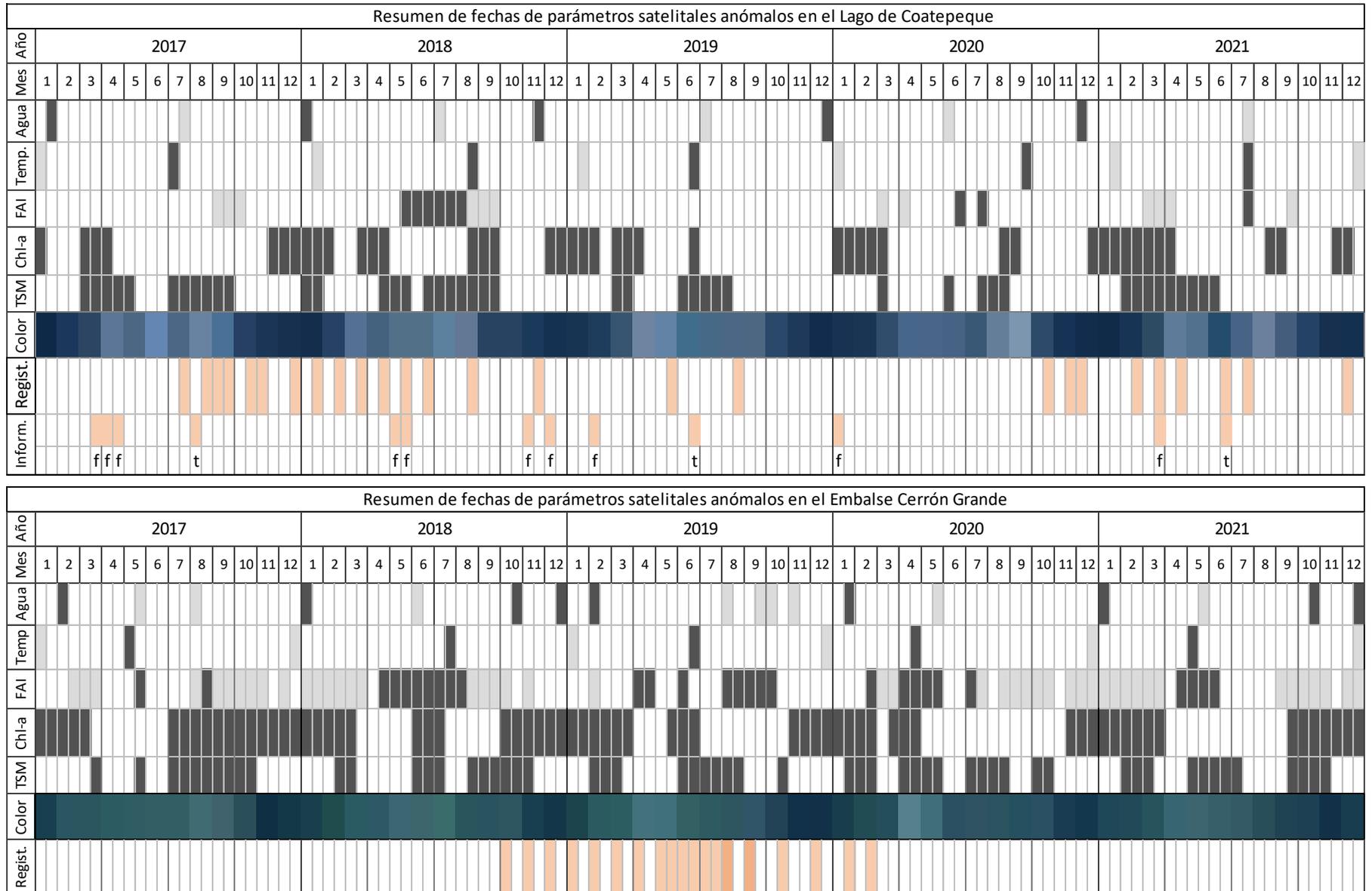


Figura 49 - Consolidado de gráficas resultado de estimaciones satelitales en el Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

Figura 50 - Resúmenes de fechas anómalas de parámetros satelitales del agua de LC y ECG, periodo 2017-2021.



Nota. Valores máximos de color gris oscuro, mínimos en gris claro, fechas de registros e informes en color salmón. Letra “f” en referencia a presencia de filamentos verdes y “t” para cambio de coloración turquesa.

DISCUSION DE RESULTADOS

5.1. Discusión de estimaciones satelitales de parámetros

En este apartado se hará discusión de los resultados de las estimaciones de índices y parámetros ambientales del agua. Se analizarán las gráficas individuales, se evaluará la correlación entre parámetros satelitales y registros de mediciones *in situ*, y se analizará la correspondencia entre los comportamientos de los datos obtenidos en cada cuerpo de agua. El objetivo principal es analizar, evaluar e identificar comportamientos existentes en las dinámicas del Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande. Durante el periodo 2017-2021 se obtuvieron los parámetros satelitales de: superficie del espejo de agua (km²), temperatura (°C), índice de algas flotantes (adimensional), clorofila-a (mg/m³), materia total suspendida (g/m³) y color del agua.

5.1.1. Discusión de parámetros satelitales en el Lago de Coatepeque

Superficie del espejo de agua en LC

Los resultados indican un comportamiento de la superficie del espejo de agua en forma de patrón cosenoidal con un periodo anual. Los valores más altos de superficies, de acuerdo con la tabla 10, se presentan a finales de noviembre, en diciembre y los primeros días de enero, seguidamente se marca un descenso sostenido hasta los valores mínimos identificadas entre los meses de junio y julio, posteriormente los valores crecen progresivamente hasta los máximos. Este patrón identificado satelitalmente, en la figura 51, fue consistente durante el periodo 2017-2021.

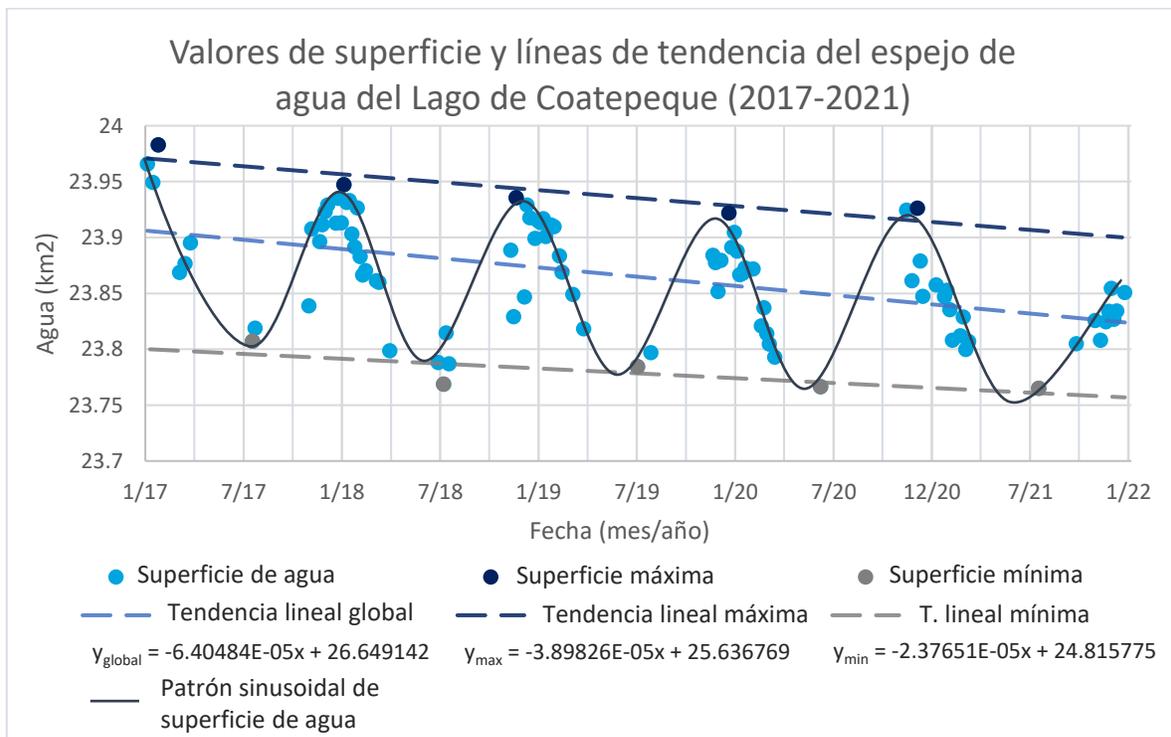


Figura 51 - Gráfica de valores de superficie, líneas de tendencia y patrón de superficie del espejo de agua en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

El Lago de Coatepeque se encuentra en una cuenca endorreica, lo que implica que el cuerpo léntico es producto de la precipitación, y aporte de aguas subterránea de la zona del volcán Ilamatepec y el Cerro Verde (figura 52). Los periodos donde se identifican valores máximos ocurren posterior a la época lluviosa de El Salvador, la cual finaliza en octubre de acuerdo con SNET (2005); de forma inversa, los valores mínimos ocurren a mitad de año, en los meses iniciales de la época lluviosa.



Figura 52 - Piezometría y dirección de flujo subterráneo en el Lago de Coatepeque. Fuente: Sistema de Información Hídrica, MARN.

Las líneas de tendencia global de los datos, la asociada a los valores máximos y la línea de los valores mínimos realizadas por medio de regresión por mínimos cuadrados resultan con pendientes negativas. El comportamiento de disminución progresiva de la superficie del espejo de agua en LC probablemente es consecuencia directa de factores antrópicos; de acuerdo con los datos de la tabla 20, el promedio de las diferencias entre el valor máximo y el máximo con fecha anterior resulta en promedio con una disminución anual de 0.0142 km², similarmente el promedio de la diferencia de valores mínimos es 0.0106 km², ambos concordantes con una reducción de la superficie del agua de 0.01 km² por año.

Instituciones nacionales (MARN, 2018) establecen una superficie total del Lago de Coatepeque de 25.3 km², un valor significativamente mayor respecto a la máxima superficie espectralmente identificada como agua el 25 de enero del 2017 con 23.9829 km², obteniendo una diferencia de 1.3171 km², la diferencia es mayor para los demás datos de la serie.

Tabla 20 - Reducción de la superficie del espejo de agua en el Lago de Coatepeque a partir de valores máximos y mínimos.

Fecha máximos	Máximo (km ²)	Diferencia máximos (km ²)	Fecha mínimos	Mínimos (km ²)	Diferencia mínimos (km ²)
25/1/2017	23.9829	---	19/7/2017	23.8073	---
5/1/2018	23.9472	-0.0357	9/7/2018	23.7687	-0.0386
21/11/2018	23.9356	-0.0116	4/7/2019	23.7843	0.0156
21/12/2019	23.9219	-0.0137	8/6/2020	23.7666	-0.0177
5/12/2020	23.9261	0.0042	18/7/2021	23.765	-0.0016
Promedio	23.9427	-0.0142	Promedio	23.7784	-0.0106

Nota. Valores tomados de la tabla 10 de la superficie del espejo de agua en LC durante 2017-2021.

Temperatura superficial del agua de LC

La temperatura de las capas superficiales del agua del Lago de Coatepeque durante el periodo 2017-2021 presenta un comportamiento semi cosenoidal con periodo anual. Durante su ciclo se ve influenciado por las condicionantes del estado del tiempo y clima, que influyen diariamente en la temperatura percibida por el satélite. De acuerdo con los datos de la tabla 11 los valores mínimos ocurren entre la segunda quincena de diciembre y enero, éste es el patrón más consistente. De forma inversa, los valores más altos de temperatura se presentan entre junio y septiembre.

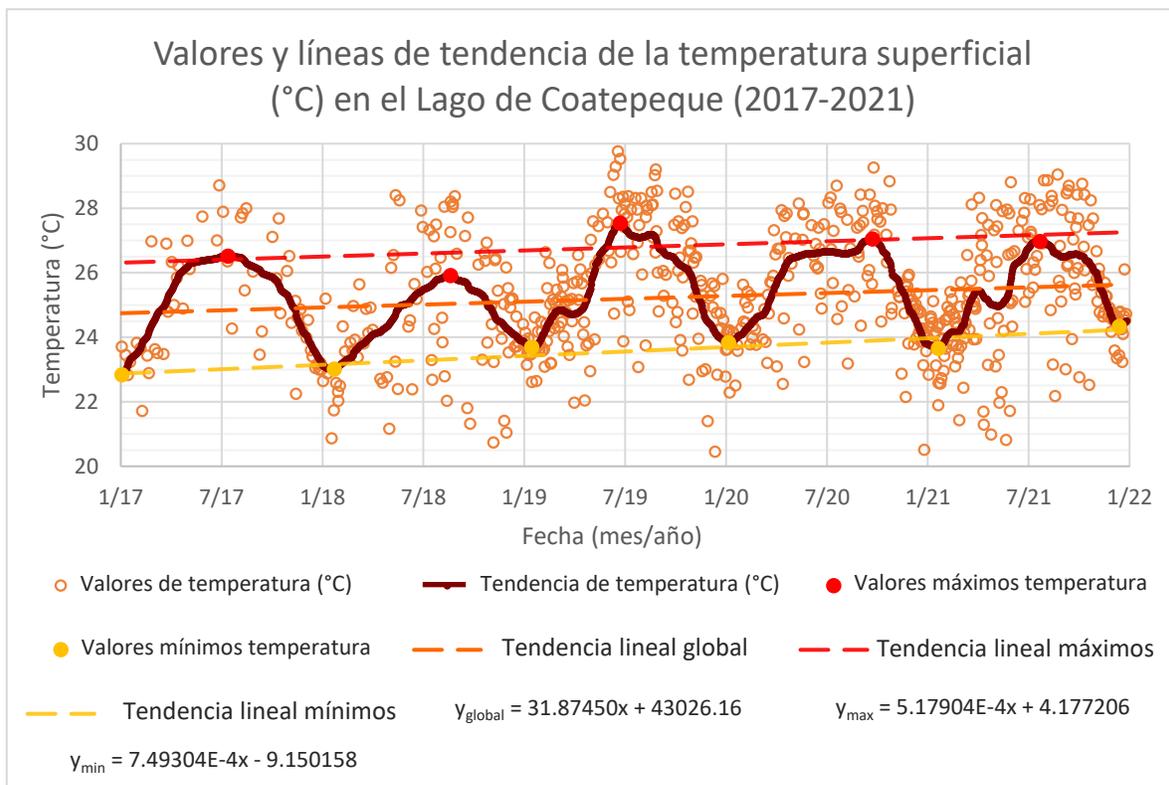


Figura 53 - Gráfica de valores de temperatura superficial (°C) y líneas de tendencia en el agua del Lago de Coatepeque (2017-2021).

Los valores mínimos de temperatura coinciden con el inicio del invierno del hemisferio norte donde se da una disminución de la energía solar irradiada, además es una época en donde el clima del El Salvador es seco, con presencia de frentes fríos y vientos moderados que favorecen la disminución de la temperatura y fomentan una mayor mezcla del agua en el lago debido al oleaje. Contrariamente, las temperaturas más altas se dan en la época lluviosa, que corresponde al verano del hemisferio norte donde la radiación solar favorece a la absorción de calor en el cuerpo de agua.

Las líneas de tendencia global de los datos, la asociada a los valores máximos y la línea de los valores mínimos, resultan con pendientes positivas, que implica un progresivo incremento de temperatura en el cuerpo de agua probablemente como efecto del cambio climático. Las diferencias de temperatura con su fecha anterior de la tabla 21 resultan con un promedio de incremento de temperatura de 0.3°C anual.

Tabla 21 - Incremento de la temperatura de la superficie del agua en el Lago de Coatepeque a partir de los valores mínimos

Fecha mínimos	T_{min} (°C)	Diferencia de temperatura (°C)
1/1/2017	22.8382	---
24/1/2018	23.0179	0.1797
17/1/2019	23.6986	0.6807
9/1/2020	23.8315	0.1329
24/1/2021	23.6454	-0.1861
18/12/2021	24.339	0.6936
Promedio mínimo	23.5418	0.30016

Nota. Valores tomados de la tabla 11 de temperatura superficial de agua en LC durante 2017-2021.

Índice de algas flotantes en la superficie de LC

El Lago de Coatepeque durante todo el periodo 2017-2021 en la mayor parte de su superficie se identificaron valores de índice FAI medio ($0.0008 < X < 0.13$), muy pocos bajos y altos. Espectralmente los resultados indican que el agua mantiene la misma algas u algas en la mayor parte del tiempo. De acuerdo con los resultados de la tabla 12, se identifica un comportamiento periódico en los valores altos de FAI que ocurren entre junio y julio; el comportamiento puede estar asociado a la época de invierno donde existe mucha nubosidad y ocurre precipitación, escorrentía e incremento en la temperatura. Contrariamente, los valores de FAI bajo ocurren alrededor de los meses de marzo y principalmente en septiembre que se caracteriza por ser el mes más lluvioso en El Salvador.

Clorofila-a en la superficie de LC

La clorofila-a identificada en las aguas del Lago de Coatepeque durante el periodo 2017-2021, de acuerdo con la figura 54, muestra patrones bien marcados entre altas y bajas concentraciones a partir de promedios mensuales. El periodo donde se dan mayores concentraciones de clorofila-a se da desde diciembre hasta abril, y aisladamente el mes de septiembre puede presentar altas concentraciones; en el periodo, el mes con mayores concentraciones ocurre en abril, seguido de enero. Los meses que presentan bajas concentraciones ocurren de clorofila-a ocurren desde mayo hasta agosto y en octubre a noviembre. Este patrón indica que el comportamiento de chl-a en LC puede estar

relacionada con la época seca en la que existe poca o nula escorrentía, y durante la época lluviosa disminuye significativamente por debajo del valor promedio de 1.99 mg/m³.

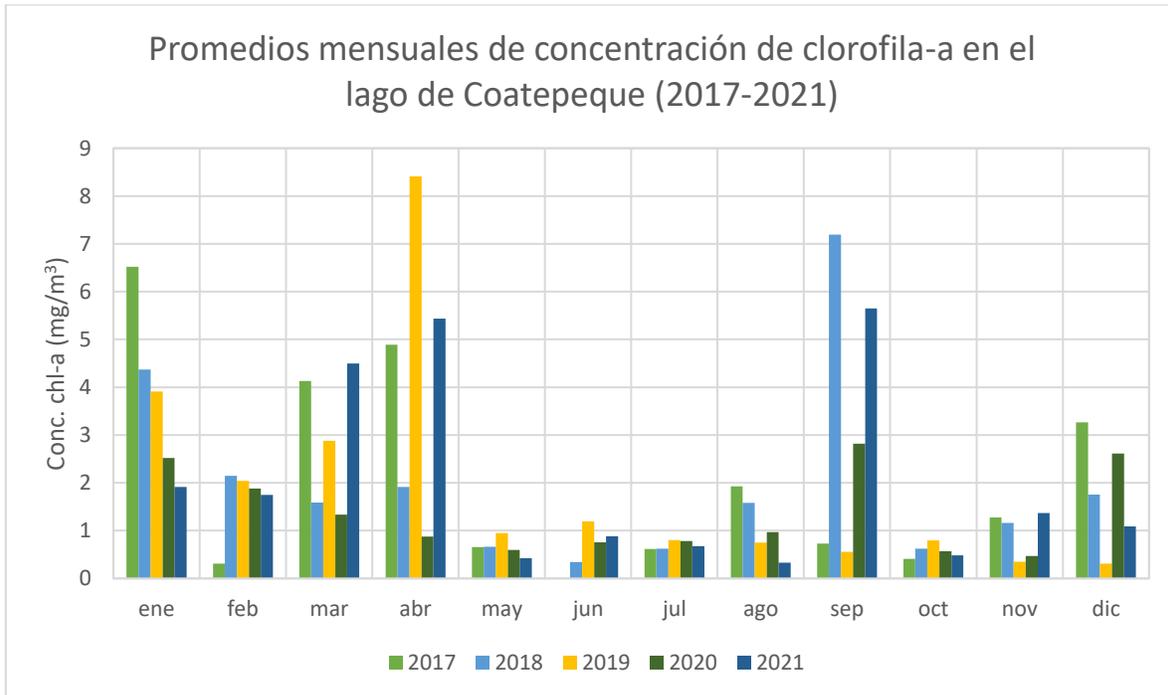


Figura 54 - Gráfica de columnas de promedios mensuales de concentración de clorofila-a (chl-a) en el lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

Materia total suspendida en la superficie de LC

La materia total suspendida en el Lago de Coatepeque en la figura 55 tiene comportamientos periódicos de altas concentraciones marcados en dos bloques, el primero ocurre entre marzo, abril y mayo, y el segundo a finales de junio y en los meses de julio, agosto y septiembre. Esta frecuencia coincide con la época de transición y durante el invierno, pudiendo estar directamente relacionado con el material orgánico e inorgánico transportado por medio de escorrentía hacia el lago. Durante el periodo 2017-2021, de acuerdo con la tabla 14, se identificaron 12 periodos anómalos por encima del valor promedio de 2.15 g/m³, el valor promedio más alto se identificó en abril del 2017; el mes que posee más valores altos es en agosto.

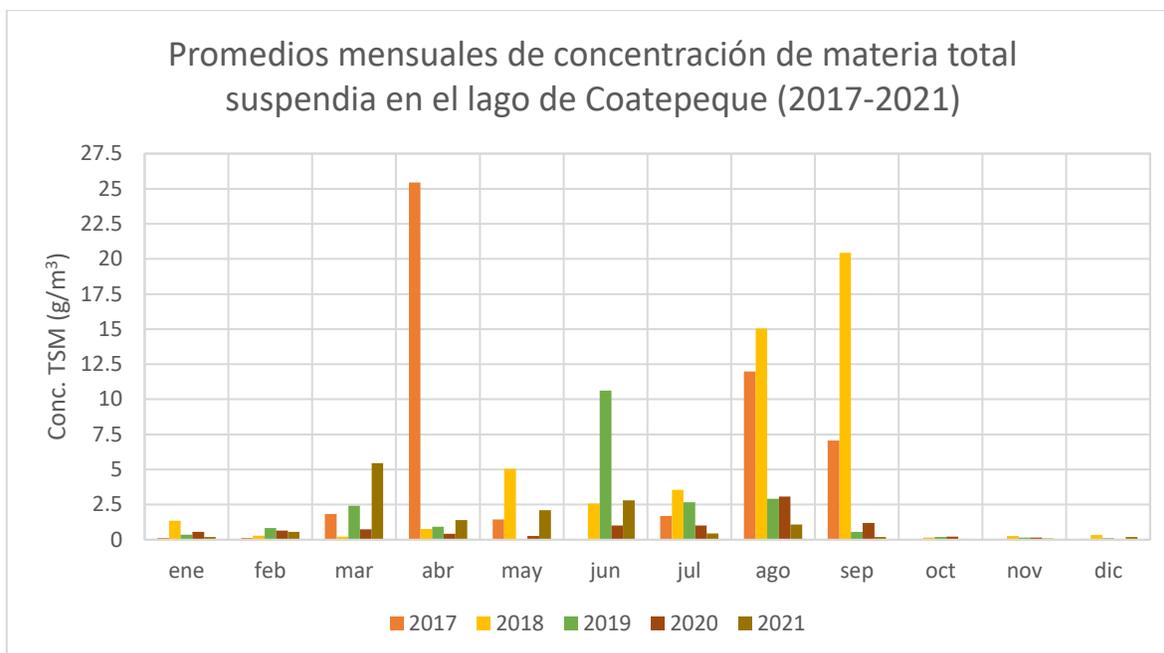


Figura 55 - Gráfica de columnas de promedios mensuales de concentración de materia total suspendida (TSM) en el lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021.

Color del agua de LC

Los colores mensuales del agua en el Lago de Coatepeque identificados en el periodo 2017-2021 presentan dos comportamientos periódicos marcados, uno de tonalidades azul oscuro entre los meses de noviembre y febrero, y el otro ocurre entre abril y septiembre donde el color del agua cambia a tonalidades de azul más claras. Entre estos periodos se encuentran los meses de marzo y octubre, los cuales se identifican como periodos de transición entre los entre tonalidades claras y oscuras.

En la obtención del color del agua pudo incidir factores que ligeramente aportaran altas reflectancias asociadas a colores blancos, pudieron incidir dos fuentes principales: la atmosférica a través de nubes y aerosoles, y el reflejo directo de la luz solar desde la superficie del oleaje en el lago. Estas son condicionantes particulares de la ubicación geográfica y clima. De acuerdo con la figura 50, los registros de cambio de coloración turquesa del agua en LC ocurren en el periodo de azul con tonalidades claras, en junio y agosto.

5.1.2. Discusión de parámetros satelitales en el Embalse Cerrón Grande

Superficie del espejo de agua en ECG

En los resultados de la superficie del espejo de agua (figura 56) se identifica un patrón semi cosenoidal con periodo anual, presenta variación de las amplitudes en cada ciclo por lo que se interpreta que dentro del ciclo de crecimiento y decremento de la superficie del agua intervienen procesos que intervienen. Los valores de superficies más grandes ocurren entre octubre y febrero, contrariamente, los menores valores del espejo de agua identificados espectralmente ocurren entre mayo y noviembre.

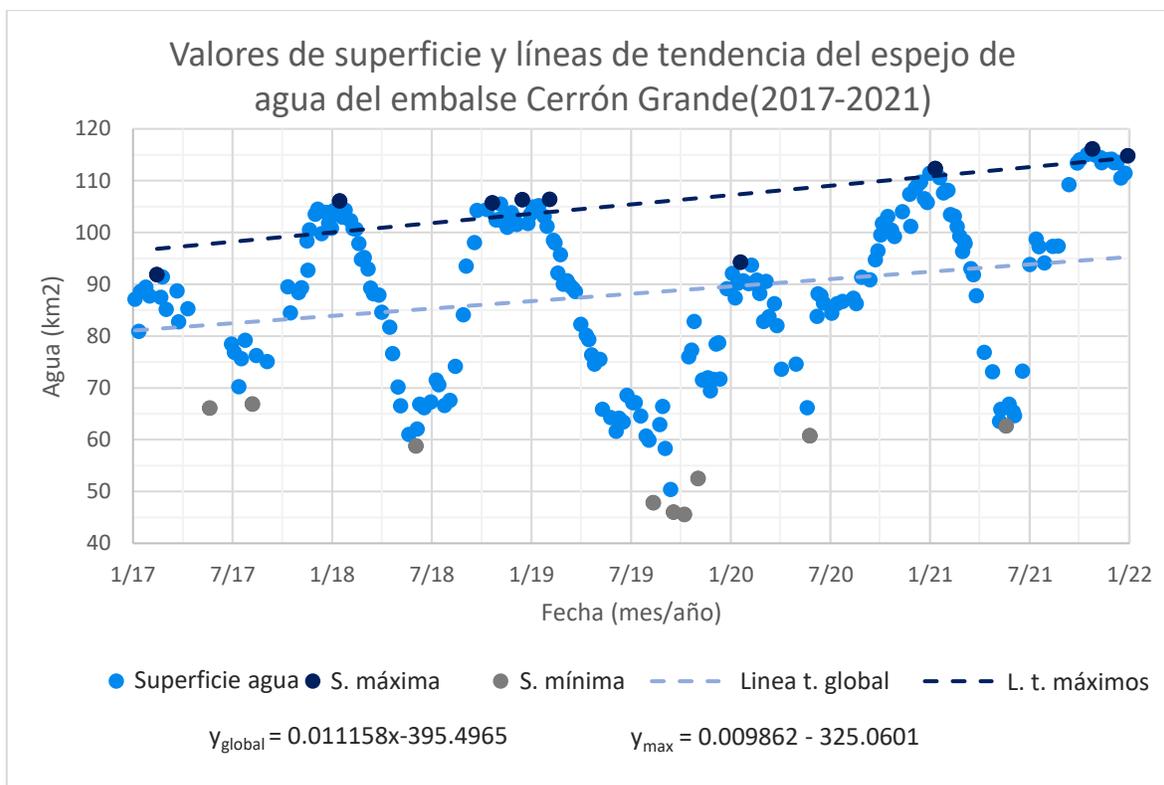


Figura 56 - Gráfica de valores de superficie y líneas de tendencia de agua en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021).

La línea de tendencia global de los datos del espejo de agua muestra una tendencia al alza, pero esto no implica un real aumento de la superficie del agua del embalse, sino como superficie espectralmente identificada como agua y como probable disminución de factores como vegetación flotante y altas concentraciones de sedimentos. La línea de tendencia de los máximos indica un aumento de la superficie del espejo de agua en ECG. La tabla 22 resume las máximas superficies, sus fechas y la diferencia entre valores máximos que resultaron en su mayoría con valores positivos de crecimiento del espejo de agua, sin embargo, el año 2020 presentó una disminución significativa. El promedio de la diferencia entre máximos resulta con 4.717 km² de incremento en el periodo 2017-2021 para el ECG.

Tabla 22 – Comportamiento de superficies máximas y mínimas en el Embalse Cerrón Grande (2017-2021)

Fecha máximos	Máximo (km ²)	Diferencia máximos (km ²)	Fecha mínimos	Mínimos (km ²)
14/2/2017	91.8614	---	May-Ago/17	66.4715
15/1/2018	106.0787	14.2173	4/6/2018	58.8451
Oct/18-Feb/19	106.1309	0.0522	Ago-Nov/19	47.96245
20/1/2020	94.2386	-11.8923	26/5/2020	60.7398
11/1/2021	112.3222	18.0836	21/5/2021	62.656
Oct-Dic/21	115.4467	3.1245	---	---
Promedio	102.12636	4.71706	Promedio	59.33497

Nota. Valores tomados de la tabla 15 de superficie del espejo de agua en ECG durante 2017-2021.

En los valores de superficie del espejo de agua incide cobertura de vegetación flotante como capas densas de microalgas flotando, algas y jacinto de agua en la superficie. Estos ocurren con alta recurrencia durante el año, pudiendo estar directamente relacionados con la descarga de los ríos de aguas sin tratamiento provenientes de las ciudades de San Salvador y Santa Ana, así como por incorporación de nutrientes por escorrentía en la cuenca.

El embalse Cerrón Grande es utilizado para la generación hidroeléctrica, por tanto, existe una fluctuación del nivel de agua en función del aprovechamiento, así como de factores naturales como evaporación. La variación en las zonas inundables, poco profundas son los sitios donde más se identifica el avance y retroceso de las aguas, siendo un efecto percibido al extraer la superficie del espejo de agua.

De acuerdo con la extensión de la cuenca de 8,560 km², los ríos (figura 18), la piezometría y las líneas de flujo, el embalse de agua tiene entrada de agua superficial por medio de ríos y escorrentía, y de agua subterránea (figura 57). Estos aportes favorecen a mantener el volumen y la superficie de agua en el embalse, y amortiguar las pérdidas por descarga de la presa, evaporación, entre otros factores.

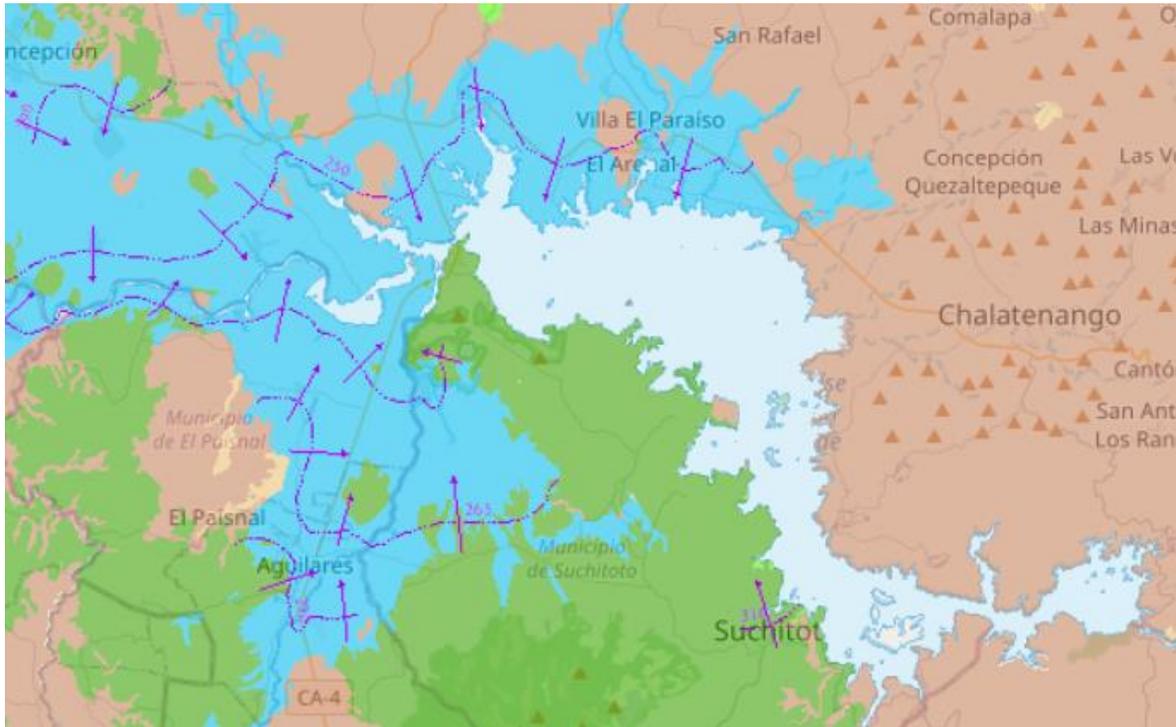


Figura 57 - Piezometría y dirección de flujo subterráneo en el Embalse Cerrón Grande. Fuente: Sistema de Información Hídrica (SIHI), MARN.

De acuerdo con MARN (2018), la cota máxima es alcanzada al final de la época lluviosa con una extensión aproximada de 102.24 km² en octubre, y disminuye de nivel a partir de diciembre hasta una extensión aproximada 69 km². El valor promedio máximo de la serie satelital 2017-2021 del ECG resultó en 102.13 km² de espejo de agua, un valor muy similar al de los registros, en cambio el valor mínimo promedio resultó ser menor, con 59.33 km² y una diferencia de 9.67 km² con los registros.

Temperatura superficial del agua de ECG

Las temperaturas en la superficie del agua en el embalse Cerrón Grande obtenida en el periodo 2017-2021, en general presenta un comportamiento semi cosenoidal con periodo anual. Se identifican dos patrones de amplitudes, antes del 2019 las amplitudes máximas con tendencia semi circulares probablemente producto de la reducida cantidad de datos recopilados. A partir del 2019, las amplitudes mostraron tendencias triangulares con periodos de crecimiento y decremento lineales, pudiendo interpretarse como un cuerpo susceptible a almacenar y emitir energía térmica con una diferencia de 3.66°C entre el promedio del valor máximo de 31.64°C y el valor promedio mínimo de 27.98°C.

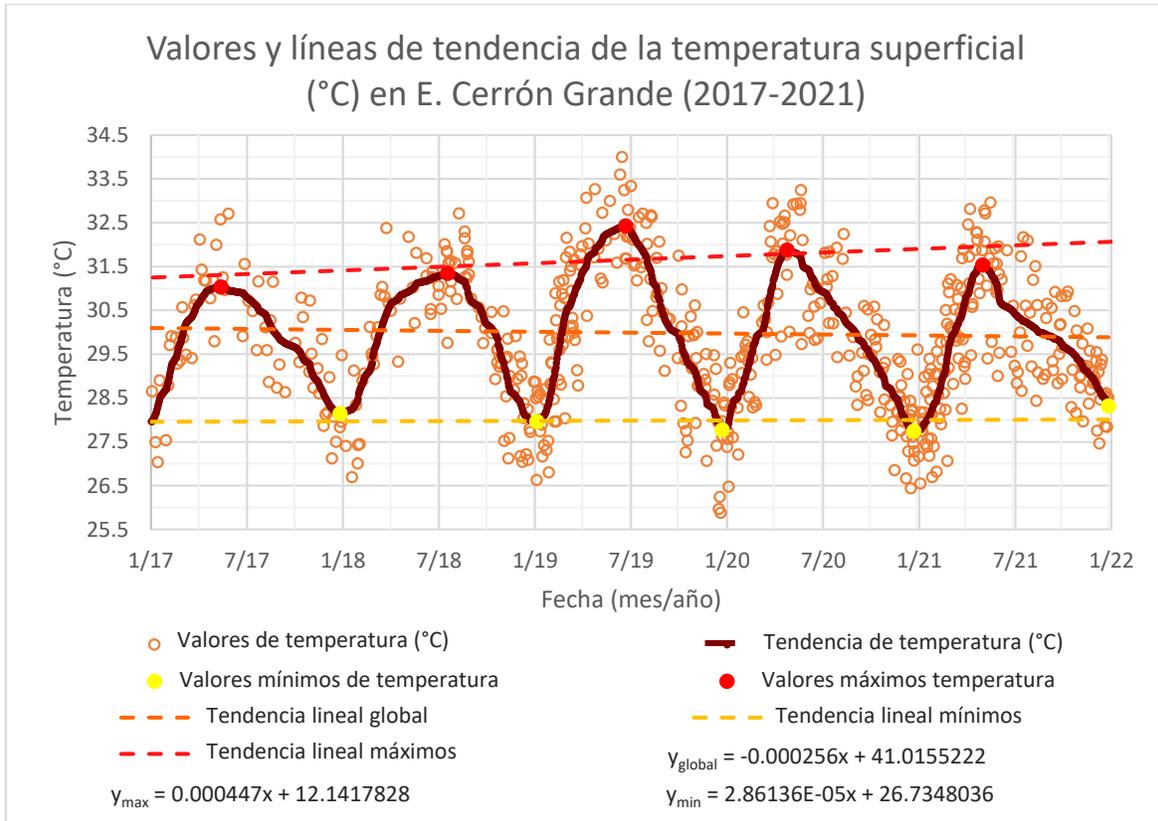


Figura 58 - Gráfica de valores de temperatura superficial (°C) y líneas de tendencia en el agua del embalse Cerrón Grande (2017-2021).

De acuerdo con los resultados de la serie, los valores mínimos ocurren entre diciembre y enero, estas épocas coinciden con el periodo de invierno en el hemisferio norte en donde la radiación solar disminuye, por tanto, existe una reducción en la cantidad de energía almacenada; adicionalmente, es una época en la que se presentan frentes fríos y vientos que favorecen el aumento de oleaje, convección y descenso de la temperatura. La línea de tendencia de valores mínimos presenta una pendiente positiva con tendencia a crecer en el tiempo en 0.07°C al año.

Contrariamente, los valores más altos de temperatura se presentan entre abril y julio, fechas que coinciden con el verano en la que ocurre la época lluviosa y la radiación solar favorece a la absorción de calor en el cuerpo de agua. La línea de tendencia de valores máximos resultó con pendiente positivas, que implica un progresivo incremento de temperatura en el

cuerpo de agua debido a múltiples factores, entre ellos probablemente incida el cambio climático. En la serie, es importante remarcar que el año 2019 presentó la mayor temperatura, alcanzando hasta 32.42°C.

Tabla 23 - Resumen de valores máximos, mínimos y promedios de la línea de tendencia de temperatura (°C) en la superficie del Embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

Fecha máximos	T_{max} (°C)	Diferencia máximos (°C)	Fecha mínimos	T_{min} (°C)	Diferencia mínimos (°C)
15/5/2017	31.0346		1/1/2017	27.9663	
21/7/2018	31.3467	0.3121	28/12/2017	28.1443	0.178
25/6/2019	32.4242	1.0775	7/1/2019	27.9587	-0.1856
28/4/2020	31.8725	-0.5517	26/12/2019	27.7747	-0.184
5/5/2021	31.5325	-0.34	25/12/2020	27.7435	-0.0312
			31/12/2021	28.3145	0.571
Promedio máximo	31.6421	0.1245	Promedio mínimo	27.9837	0.0696

Nota. Valores tomados de la tabla 16, de valores de temperatura del ECG en la gráfica 58.

La línea de tendencia global de los datos presenta una pendiente negativa, cuya tendencia puede interpretarse como errónea, debido a que durante los meses de la época seca la nubosidad es reducida o nula, por tanto, hubo mayor densidad de datos validos; contrariamente, en invierno la nubosidad es alta con efectos en la calidad de los pixeles hasta el punto de desechar imágenes recopiladas.

Índice de algas flotantes en la superficie de ECG

El Embalse Cerón Grande durante todo el periodo 2017-2021 tiene un comportamiento semiperiodico anual, la figura 35 muestra magnitudes altas de FAI alto entre los meses de abril hasta julio, en ocasiones se extiende hasta septiembre u octubre. Contrariamente, existen magnitudes bajas de FAI alto entre septiembre y abril, este comportamiento es consistente en todos los años. Por otro lado, la superficie cubierta por FAI bajo también posee un comportamiento semiperiodico contrario al FAI alto, con la diferencia que los periodos de magnitudes altas tienden a no extenderse tanto. En el caso del FAI medio, la superficie que cubre es variante en función del FAI alto y bajo, sin embargo, en la mayor parte del tiempo puede cubrir entre el 30% y el 40% de la totalidad del cuerpo de agua. Es importante tomar en cuenta que el Embalse Cerrón Grande es el cuerpo de agua más grande de El Salvador y su forma, en “L” invertida y alargada, facilita a la existencia de múltiples procesos a ocurriendo al mismo tiempo en el cuerpo lenticó.

Clorofila-a en la superficie de ECG

La clorofila-a identificada en las aguas del Embalse Cerrón Grande durante el periodo 2017-2021 presenta patrones ligeramente marcado. Los periodos donde la clorofila-a presenta valores altos pueden iniciar a partir del mes de octubre y noviembre hasta marzo, así como a finales de mayo y en junio, sin embargo, la variación interanual es diversa dificultando una generalización. En la serie se identificaron 9 periodos por encima del valor promedio de 11.48 mg/m³, el cual es un valor alto que indica una continua ocurrencia de floración de microalgas durante la mayor parte del año en el cuerpo de agua.

La dinámica de un embalse puede estar influenciada directamente por el agua de los efluentes que descargada en él, en este caso con aguas provenientes del río Lempa que incorpora permanentemente aguas de la ciudad de San Salvador y Santa Ana con vertidos domésticos e industriales. Consecuentemente, el aporte continuo de nutrientes y la disminución de caudales en los ríos puede disparar las floraciones, estos altos valores de clorofila-a entre octubre y marzo.

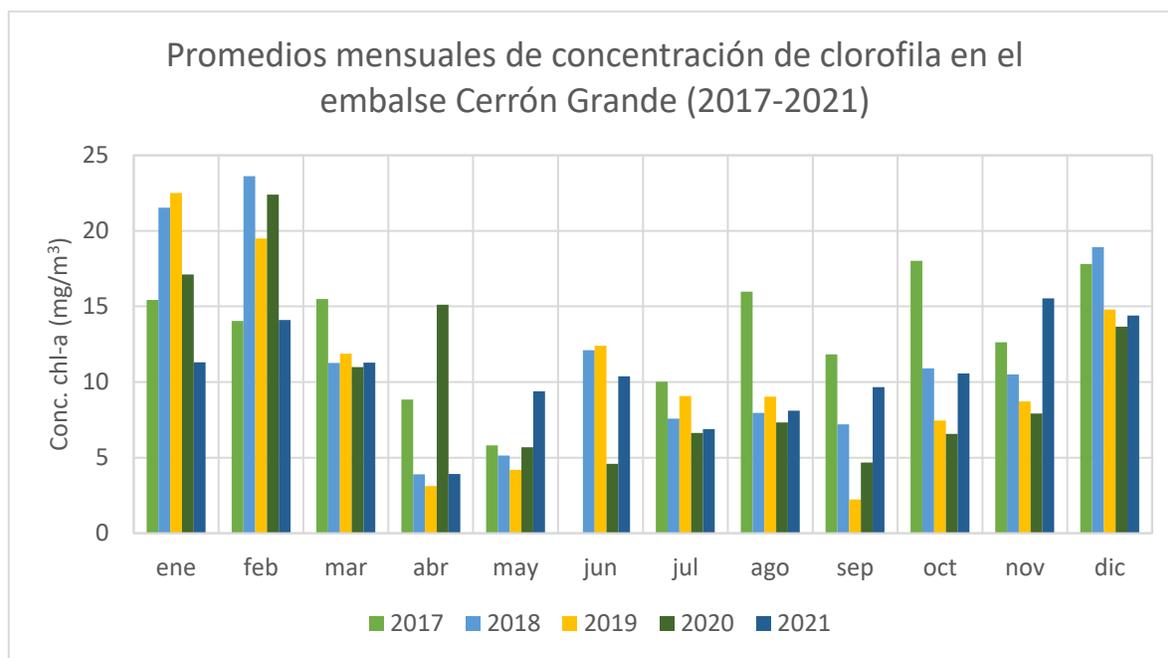


Figura 59 - Gráfica de columnas de promedios mensuales de concentración de clorofila-a (chl-a) en el embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

El embalse es cuerpo de agua lenticó con una geometría alargada cuya dinámica en los extremos puede ser diferente, es más frecuente la floración de algas en la zona más cercana a la desembocadura del río Lempa. Sin embargo, con el objeto de simplificar resultados se calculó el promedio de clorofila-a para todo el cuerpo de agua, esto puede enmascarar fenómenos y mostrar únicamente comportamientos observados en la mayoría de los píxeles.

Materia total suspendida en la superficie de ECG

La materia total suspendida en el Embalse Cerrón Grande tiene comportamientos periódicos marcados, el periodo con las más altas concentraciones puede iniciar en mayo hasta octubre; este periodo puede ser resultado del periodo lluvioso, con la incorporación de materia orgánica e inorgánica con un aumento de escorrentía y caudales en ríos que desembocan en el embalse. En noviembre y diciembre los valores son bajos. Seguidamente, el segundo periodo de altas concentraciones ocurre entre enero y marzo, en donde solo existe aporte de ríos perennes y la descarga de aguas de las ciudades. Finalizando, abril que es un mes que presenta consistentemente muy bajas concentraciones de TSM.

Durante el periodo 2017-2021, se identificaron 17 periodos anómalos por encima del valor promedio de 2,488.79 g/m³. Los valores de TSM obtenidos en la serie son altos, esto es

debido al uso de redes neuronales con reducido entrenamiento en cuerpos de agua complejos como el ECG

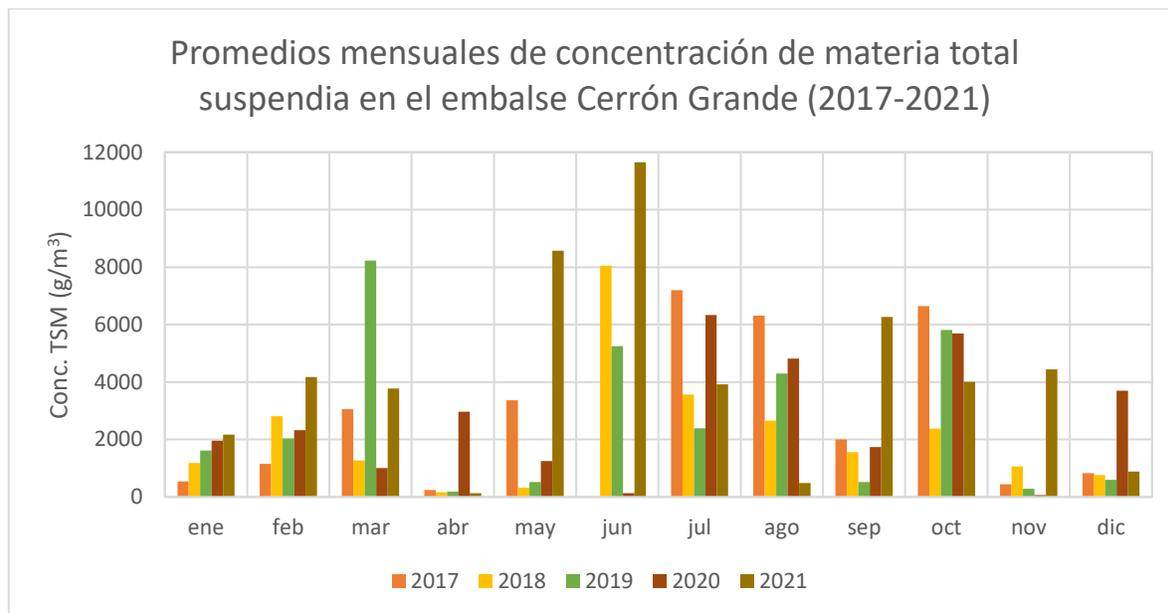


Figura 60 - Gráfica de columnas de promedios mensuales de concentración de materia total suspendida (TSM) en el embalse Cerrón Grande en el periodo 2017-2021.

Color del agua de ECG

Los colores mensuales del agua en el Embalse Cerrón Grande identificados en el periodo 2017-2021, observados en la figura 36, presentan dos comportamientos distribuidos en el año, el color azul puede presentarse entre agosto hasta enero, y el azul con tonalidad verde puede presentarse desde febrero hasta octubre. A pesar de no presentarse un comportamiento periódico de variación del color a final del año, sí ocurre a principios de año, a partir de febrero.

La incorporación de señales o colores verdes se debe a la presencia de microalgas suspendidas o flotando en el agua; durante el proceso de identificación la geometría del espejo de agua, el jacinto de agua y las capas densas de microalgas flotante que espectralmente se asociaban a vegetación fueron excluidas. Adicionalmente, la existencia de algas en zonas poco profundas y pasto en las zonas inundadas pudo ser un factor de exclusión de píxeles o aporte de tonalidades verdes.

A pesar de que las imágenes satelitales con las que se obtuvo el color del agua pudieron incidir factores que ligeramente aportaran reflectancias asociadas a colores blancos, provenientes de dos fuentes principales: la atmosférica a través de nubes y aerosoles, y el reflejo directo de la luz solar desde la superficie del oleaje del embalse. Estas son condicionantes particulares de la ubicación geográfica y clima.

5.2. Discusión de estimaciones de parámetros satélites con registros de medidas *in situ*

De acuerdo con los resultados de la correlación de parámetros satelitales con registros de datos *in situ* se analizará el comportamiento entre las series de temporales para evaluar si los resultados son concordantes o no, y validar las estimaciones de parámetros satelitales en el Lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande durante 2017-2021.

5.2.1. Discusión de parámetros satelitales y registros *in situ* en el Lago de Coatepeque

Temperatura satelital y registros *in situ*

Para los registros de temperatura medidos *in situ* y los datos estimados satelitalmente se identifica que ambas series presentan comportamientos similares en periodo con mínimos entre diciembre y enero, y máximos a medios de año; por tanto, también con las estaciones climáticas y la disponibilidad de energía solar. La amplitud de la señal *in situ* tiende a ajustarse con la línea de tendencia global en los periodos de bajas temperaturas obteniendo valores más representativos de la realidad. Sin embargo, no sucede lo mismo con las amplitudes máximas, los datos *in situ* tienen a tener magnitudes similares a los valores máximos registrados satelitalmente, presentando una diferencia que puede ser superior a 1.25°C respecto a los valores de la línea de tendencia. Durante los periodos de transición entre amplitudes máximas, los comportamientos de ambas series tienden a ser similares.

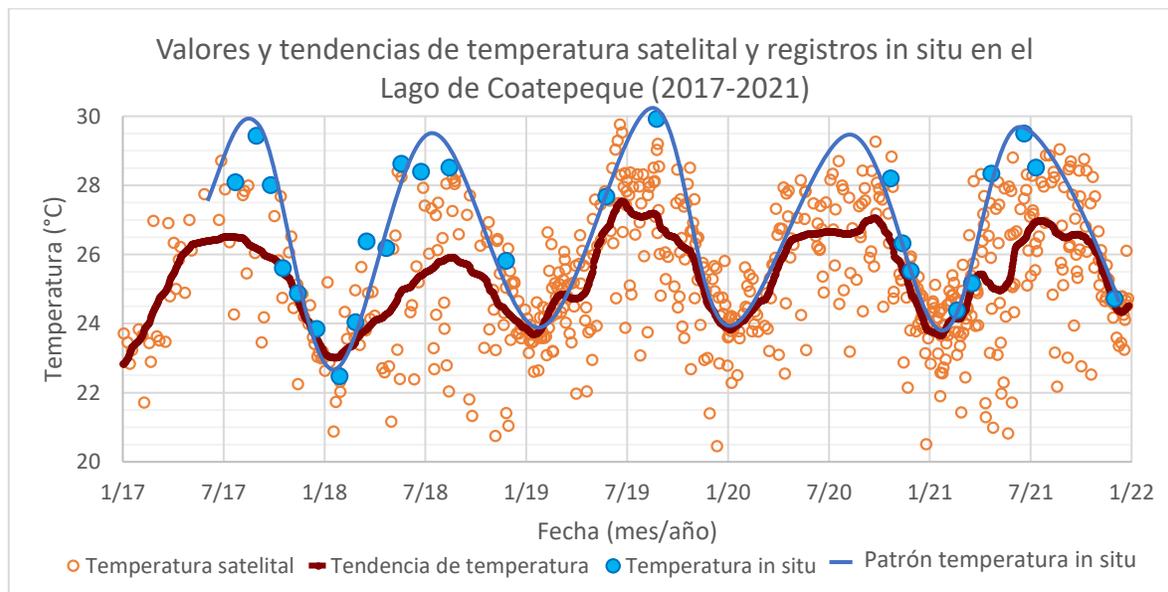


Figura 61 – Gráfica de valores y tendencias de temperatura satelital y registros *in situ* en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

Múltiples factores pueden incidir en la diferencia entre las series. Los registros *in situ* fueron realizados en horario matutino, entre las 9:00 am hasta las 12:00 md, tomadas a una profundidad aproximada de 0.5 m, pudiendo representar de la zona más cálida del cuerpo de agua producto de la radiación solar. En cambio, las imágenes satelitales capturan una temperatura diurna en distintos horarios, pudiendo ser en la mañana o tarde.

Clorofila-a satelital

Los resultados de las figuras 38 y 39 muestran que en la serie temporal de clorofila-a satelital del Lago de Coatepeque en el periodo 2017-2021 no muestran correlación alguna con los registros medidos *in situ* de la profundidad del disco Secchi, ni con la conductividad eléctrica medida en el agua. Los valores satelitales de chl-a estimados y su línea de tendencia de chl-a no se ajusta a las variables, por lo que estas variables pueden no estar relacionados en la dinámica del cuerpo de agua.

La clorofila-a satelital es un indicador de la cantidad de microalgas presentes en el agua. En los altos valores de chl-a identificados en la serie, donde se esperaría una reducción en la profundidad del disco Secchi como efecto de la materia orgánica de las microalgas en suspensión, no se identificó relación alguna. Esto podría deberse a los sitios en los que se realizaron las mediciones *in situ* y las fechas de toma de datos, por tanto, las medidas pueden no ser representativas de los fenómenos que ocurren en el agua.

La conductividad eléctrica es una medida en función de la cantidad de iones disueltos en el agua. Los altos valores de chl-a estimados satelitalmente no están relacionados al comportamiento de conductividad eléctrica en la serie. Incrementos o decrementos de la conductividad, como posible efecto de aporte de material por escorrentía, no es un indicador ante los eventos de incremento de chl-a, consecuentemente de floraciones de microalgas que ocurren en el Lago de Coatepeque.

Materia total suspendida

Se identificó que la variable óptica de materia total suspendida (TSM), asociada a los objetos en suspensión y disueltos, se correlaciona con el logaritmo de la profundidad (cm) del disco Secchi. En los periodos que existen incrementos significativos de TSM la profundidad disminuye, con una relación inversa en magnitudes. Por tanto, la estimación satelital es lo suficientemente sensible ante los incrementos de materia en el agua que impiden la penetración de luz.

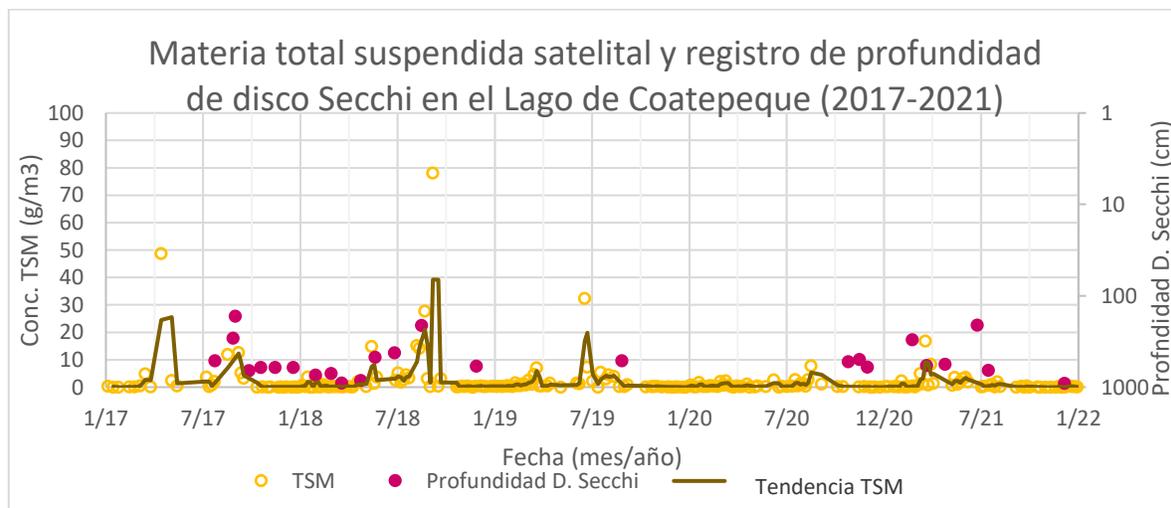


Figura 62 - Gráfica de correlación entre materia total suspendida satelital y registro de profundidad de disco Secchi en escala logarítmica en el Lago de Coatepeque (2017-2021).

Caso contrario, no existe una relación entre los valores de materia total suspendida y la conductividad eléctrica. Esto puede deberse a que la materia presente en el agua del lago incorpora elementos que no incrementan la conductividad eléctrica como sales, pudiendo ser materia orgánica y elementos sedimentables. Esto puede ser un efecto del corto recorrido de la escorrentía superficial al ser una cuenca endorreica con una línea de partaguas próxima al cuerpo de agua al ser de origen calderico.

5.2.2. Discusión de parámetros satelitales y registros *in situ* en el Embalse Cerrón Grande

Temperatura satelital y registros *in situ*

El comportamiento de los registros de temperatura *in situ* son similares a la variación de temperatura anuales registrada satelitalmente, sus comportamientos son parecidos, pero con diferentes magnitudes. Además, los registros *in situ* muestran dos comportamientos diferentes, desde septiembre del 2018 hasta agosto del 2019 los valores son similares o inferiores a los registros satelitales; la segunda tendencia ocurre desde mayo del 2019 hasta febrero del 2020 donde los registros tienen valores similares o superiores a los obtenidos satelitalmente.

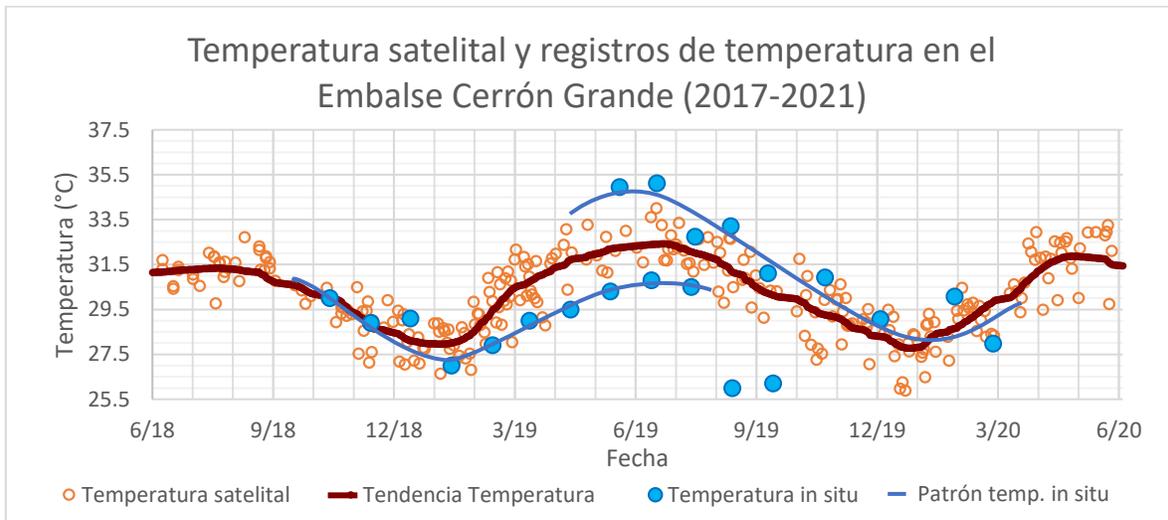


Figura 63 - Tendencia y correlación entre temperatura satelitales e *in situ* en el embalse Cerrón Grande (2018-2019).

En los datos de mediciones *in situ* pudo haber incidido la metodología, la hora y la ubicación de la toma o medición del parámetro, en importante mencionar que estos registros fueron realizados por dos instituciones de investigación. A pesar de la variación en magnitud entre los registros *in situ* y las estimaciones satelitales de temperatura, los valores tienen comportamientos similares y son correspondientes a efectos de las estaciones en el año y la disponibilidad de energía solar durante el año, donde los mínimos ocurren entre diciembre y febrero, y los máximos alrededor de los meses de mayo y julio.

Clorofila-a satelital

En el embalse Cerrón Grande las series temporales de clorofila-a satelital no muestran correlación alguna con los registros medidos *in situ* de la profundidad del disco Secchi, ni con la conductividad eléctrica. Consecuentemente, los valores de las series, las líneas de tendencia y los valores por cada fecha de medición directa en el agua no tienen tendencias correspondientes o asociables, como se observa en las figuras 44 y 45.

La clorofila-a satelital es un indicador de la cantidad de microalgas presentes en el agua. Altos valores de chl-a podrían estar asociados a una reducción en la profundidad del disco Secchi por efecto de las microalgas, sin embargo, no se identificó relación alguna. Esto podría deberse a los sitios donde se tomaron las mediciones y las fechas de toma de datos, pudiendo no ser representativas de los fenómenos que ocurren en el agua.

La conductividad eléctrica es una medida en función de la cantidad de iones disueltos en el agua. De acuerdo con los resultados, altos valores de chl-a no están relacionados al comportamiento de conductividad eléctrica, ya que no existe correlación antes, durante y posterior a eventos anómalos de chl-a, no es un indicador ante eventos de floraciones de microalgas que ocurren en el Lago de Coatepeque.

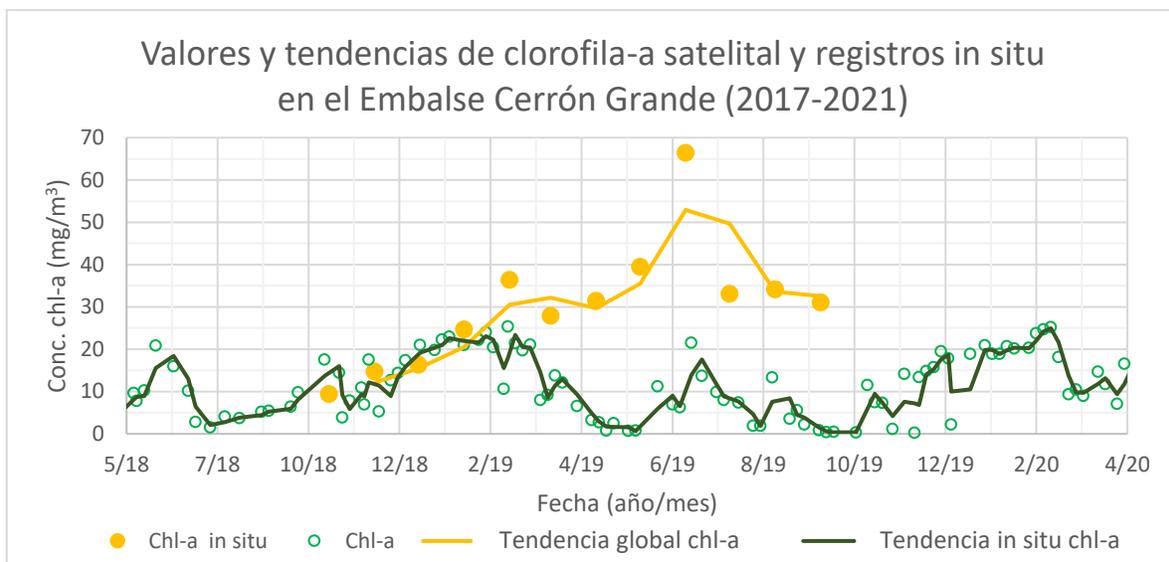


Figura 64 - Correlación y líneas de tendencia entre clorofila-a *in situ* y satelital (2018-2019).

Sin embargo, al comparar los resultados entre la clorofila-a satelital con la clorofila-a *in situ* tienen comportamientos similares durante 5 meses, desde octubre del 2018 hasta febrero del 2019 las tendencias coinciden en magnitud y crecimiento. Posterior a febrero, el comportamiento es similar, con la diferencia de tener en magnitudes *in situ* superiores a las de la línea de tendencia satelital; esta diferencia pudo deberse a que los sitios de muestreo no reflejen el comportamiento global del cuerpo de agua que sí es observado globalmente con las imágenes satelitales.

5.3. Discusión de correlación temporal entre parámetros satelitales

A partir de los resultados obtenidos de las estimaciones satelitales de superficie del espejo de agua, temperatura, índice de algas flotantes, clorofila-a, materia total suspendida y color, se analizará la evolución temporal para correlacionar comportamientos en conjunto de los parámetros en el periodo 2017-2021 para el Lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande.

5.3.1. Discusión de correlación temporal entre parámetros satelitales para el Lago de Coatepeque

Anualmente, los parámetros físicos de temperatura y la superficie del espejo del agua presentan comportamientos inversos en sus amplitudes, pero coincidiendo en un periodo anual, donde la superficie (km²) es máxima cuando la temperatura (°C) es mínima que ocurre entre diciembre y enero, el caso inverso se da entre junio y julio. Respecto al índice de algas flotantes, se identifican valores más altos cuando la temperatura es mayor sucediendo alrededor de los meses de junio y julio, y valores mínimos en los periodos de transición entre amplitudes de temperatura en marzo y septiembre, en los periodos de menor temperatura los valores altos y bajos son mínimos.

La clorofila-a tiene la tendencia de incrementar la magnitud a partir de diciembre a abril donde la temperatura del agua es baja y ocurren superficies más grandes. La materia total suspendida tiene un comportamiento inverso, debido a que incrementan sus magnitudes desde marzo hasta septiembre, donde la temperatura alcanza su mayor temperatura y la superficie del agua es menor.

Respecto a la coloración del lago, durante los meses donde hay mayor superficie en el agua y menor temperatura el color del agua es observada con tonalidades de azul oscuro. Se identifica que en abril y agosto los colores son más claros, esto coincide con los periodos registrados con cambio de coloración a turquesa; en estos periodos siempre se identifica un incremento en la TSM y en ocasiones coincide con incrementos de clorofila-a, sin embargo, con los demás parámetros no se correlacionan. Entre mayo hasta julio se dan tonalidades ligeramente oscuras.

5.3.2. Discusión de correlación temporal entre parámetros satelitales para el Embalse Cerrón Grande

El comportamiento entre la superficie del espejo de agua en ECG es inverso en amplitudes respecto a la temperatura, pero coinciden en un comportamiento de periodos anuales. La temperatura mínima ocurre principalmente en diciembre donde también se da la superficie máxima; contrariamente, entre mayo y julio se dan los periodos de máxima temperatura y las menores superficies de agua. El índice de algas flotantes tiene un comportamiento asociado anual, cuando la temperatura es mayor y la superficie es menor los valores FAI son más altos; de manera inversa, la disminución de los valores FAI altos ocurren cuando la temperatura disminuye y la superficie del agua incrementa.

La clorofila-a tiene un comportamiento con periodos de valores más altos que ocurren cuando la temperatura es menor y la superficie es mayor, siendo los meses con mayores valores alrededor de octubre hasta marzo, sin embargo, durante todo el año los valores de chl-a siempre son superiores a 4 mg/m³. La materia total suspendida es tiene

comportamientos con altos valores que ocurren entre los meses con las aguas más cálidas y las menores superficies de agua.

La coloración observada en el agua del embalse siempre es azul con tonalidades verdes, pero durante los meses de noviembre y diciembre la tonalidad verde disminuye y se torna a un azul oscuro. Esto puede ser relacionado al comportamiento de floración de microalgas en el agua, sin embargo, durante estos meses ocurren altas concentraciones de chl-a pudiendo no estar relacionados al color; globalmente, la tonalidad identificada en el promedio de todos los píxeles del agua es azul oscuro y las floraciones pueden ocurrir en superficies con dimensiones menores por lo que pueden ocultarse el efecto de chl-a.

5.4. Discusión de correlación de comportamientos entre cuerpos de agua

La estimación de parámetros ambientales en el lago de Coatepeque y el embalse Cerrón Grande a partir de imágenes satelitales fue un ejercicio con resultados positivos debido a que se generaron series de tiempo de 5 años desde el 2017 hasta el 2021. Estas permitieron identificar que los parámetros con comportamiento similares, donde la superficie del espejo de agua y la temperatura del agua comparten las tendencias de incremento y disminución de magnitud; ambas variables son efecto directo de la disponibilidad de energía solar, el clima y las precipitaciones, que comparten un periodo anual.

Similarmente, en ambos cuerpos el color del agua presenta tonalidades de azul oscuro en meses cercanos a diciembre y enero, y tonalidades ligeramente claras durante los demás meses, por tanto, tienen tendencias similares; el color es producto de la dinámica del cuerpo de agua, pudiendo ser influenciado por ingresos de materia y nutrientes por el flujo natural de los ríos y la escorrentía.

Los parámetros estimados de clorofila-a e índice de algas flotantes en ocasiones coinciden en ocurrencia de eventos, pero no en magnitud de datos. Ambos cuerpos de agua coinciden cuando el FAI incrementa sus valores altos y bajos, pero la señal del LC presenta amplitud de periodos menores, no tan extensos como la señal del ECG. Para ambos casos, la clorofila-a presenta valores altos alrededor del mes de enero y febrero, con la diferencia que ECG tiene periodos sostenidos más largos de altas concentraciones, fácilmente semestrales, y duplicar la magnitud a los valores de LC.

La materia total suspendida tiene comportamientos coincidentes en los meses entre junio a septiembre y en marzo, con la diferencia que en los otros meses el LC presenta valores reducidos de TSM. El embalse Cerrón Grande tiene la principal característica de ser un río retenido artificialmente, naturalmente transporta alta carga de materia y sedimentos flotando o en suspensión que impiden en la penetración de luz y en la señal espectral.

CONCLUSIONES

1. Las imágenes satelitales de Sentinel permiten estimar índices y parámetros ambientales del agua de temperatura, clorofila-a, materia total suspendida, superficie de vegetación flotante, color y superficie del espejo de agua, aplicables en el estudio espacial y temporal de la dinámica de los cuerpos de agua continentales, constituyendo una herramienta eficiente para provisión recurrente y precisa de datos, con una cobertura completa en la superficie del lago de Coatepeque (LC) y el embalse Cerrón Grande (ECG).
2. El cálculo de los índices NDWI, NDVI, FAI, SWM a partir de imágenes multiespectrales facilitaron la cuantificación, interpretación y extracción de información como la cantidad de algas flotantes, cambio de coloración, crecimiento y decremento de la superficie del agua, cuya información fue utilizada para caracterizar el comportamiento cada cuerpo de agua. Permitiendo la identificación espectral de cada píxel asociado a agua, para delimitación del espejo de agua y las riberas, playas, orillas, vegetación y zonas urbanizadas en LC y ECG.
3. El Embalse Cerrón Grande presentó magnitudes significativamente superiores en todos los parámetros satelitales, y una coloración del agua con tonalidades verdes. Se evidenció periodicidad anual en los parámetros de temperatura, superficie del espejo de agua y coloración del agua a partir de los resultados gráficos, y en menor grado se identificó un patrón de incremento de la clorofila-a e índice de algas flotantes en cercanías de enero y febrero. La materia total suspendida es el parámetro que menor comportamiento estacional presentó.
4. Respecto a la correlación con registros de parámetros *in situ*, la temperatura se adecuó en tendencia y magnitud respecto a los datos satelitales en ambos cuerpos de agua. La profundidad del disco Secchi se correlacionó grandemente con el comportamiento de materia total suspendida en el lago de Coatepeque. La clorofila-a respecto a la satelital resultaron en comportamientos similares que diferían en magnitud. El comportamiento de los registros de conductividad eléctrica no se correlacionó con los parámetros satelitales.
5. Finalmente, hacer uso de imágenes satelitales en el estudio de los cuerpos de agua resultó ser una herramienta práctica y eficaz, que generó series temporales con numerosos datos, alta frecuencia y fue capaz de brindar información en la totalidad del Lago de Coatepeque y el Embalse Cerrón Grande, y puede ser aplicada a escala nacional. Sin embargo, genera estimaciones y requiere de registros de mediciones *in situ* para validar los resultados, por tanto, es una herramienta complementaria del trabajo de campo que puede solventar los vacíos entre mediciones.

RECOMENDACIONES

Para validar las estimaciones satelitales son necesarios registros *in situ*, por tanto, se recomienda generar proyectos de monitoreos complementarios para robustecer bases de datos útiles para interpretación y caracterización de los cuerpos de agua como ríos, lagos y embalses. Las fortalezas de la recurrente y periódica generación de datos satelitales pueden complementar la precisión de los datos *in situ* para hacer más eficientes y reducir costos de los estudios, focalizando esfuerzos y mejorando la red de observación de puntos.

También se recomienda a las instituciones de investigación generar informes descriptivos, detallados y periódicos de los cuerpos de agua que puedan servir de base para reanálisis y mejorar la comprensión del comportamiento de cada cuerpo de agua. Adicionalmente, se recomienda la instalación de instrumentos estacionarios como boyas para generación de una base de datos sólida y precisa que permita analizar comportamientos a pequeña escala, como la variación de temperatura diaria para correlacionar con productos satelitales en horarios nocturnos.

Los resultados de la completa superficie del embalse Cerrón Grande arrojaron la posible existencia de más de un fenómeno existiendo al mismo tiempo en el cuerpo de agua, como ingreso de sedimentos, floraciones algales, agua con condiciones normales y cobertura vegetal. Por tanto, se recomienda seccionar los cuerpos de agua para mejorar el análisis puntual que ocurre en cada sitio del cuerpo de agua, de forma que las distintas señales se oculten o repercutan entre sí.

Se recomienda aplicar un análisis multiespectral, principalmente utilizando las bandas del espectro rojo e infrarrojo para el estudio de cambios de coloración como la coloración turquesa del lago de Coatepeque y la constante floración de algas en el embalse Cerrón Grande. Por lo cual, se recomienda hacer uso de la amplia resolución espectral del sensor OLCI de Sentinel-3 para identificar de mejor manera los componentes presentes en el agua; metodología que puede ser aplicable únicamente a cuerpos de agua de dimensiones relativamente grande, debido a la resolución en superficie considerando que deben existir suficiente cantidad de píxeles asociados al color del agua para analizar comportamientos.

Debido a que los cuerpos de agua son condicionados por factores de precipitación, escorrentía, radiación solar y vientos, es aconsejable contrastar la información satelital con parámetros meteorológicos, asociando la variabilidad climática y eventos detonadores de cambios en los cuerpos de agua. Así como desarrollar un monitoreo permanente en todos los cuerpos de agua, generando bases de datos numerosas que puedan indicar existencia de efectos del cambio climático.

Adicionalmente, aplicar métodos estadísticos y análisis de series de tiempo a los datos permitiría identificar y sustentar comportamientos periódicos, así como distinguir y asociar señales de fenómenos puntuales, mejorando la caracterización de cada cuerpo de agua. Estos análisis podrían sustentar de mejor manera los resultados diarios, mensuales, estacionales, anuales e interanuales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bakker, W., Feringa, W., Gieske, A., Gorte, B., Grabmaier, K., Hecker, C., Horn, J., Huurneman, G., Janssen, L., Kerle, N., van der Meer, F., Parodi, G., Pohl, C., Reeves, C., van Ruitenbeek, F., Schetselaar, E., Tempfli, K., Weir, M., Westinga, E. y Woldai, T. (2009). Principles of Remote Sensing [Principios de la teledetección]. (4a ed.). ITC Educational Textbook Series.
- Batres, C. (2018). Caracterización del agua subterránea de la cuenca del río Suquiapa, Santa Ana, El Salvador. Revista Científica Agua, Saneamiento & Ambiente, 13.
- Bresciani, M., Giardino, C., Stroppiana, D., Dessena, M. A., Buscarinu, P., Cabras, L., Schenk, K., Heege, T. Bernet, H., Bazdanis, G. & Tzimas, A. (2019). Monitoring water quality in two dammed reservoirs from multispectral satellite data. European Journal of Remote Sensing, 52(sup4), 113-122.
- Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Stelzer, K., Embacher, S. y Ruescas, A. (2016). Evolution of the C2RCC neural network for sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. Brockmann Consult.
- Cabassi, J., Capecchiacci, F., Magi, F., Vaselli, O., Tassi, F., Montalvo, F., Esquivel, I., Grassa, F. y Caprai, A. (2019). Water and dissolved gas geochemistry at Coatepeque, Ilopango and Chanmico volcanic lakes (El Salvador, Central America). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 378, 1-15.
- Casal, G. (2013) Conceptos físicos básicos para la utilización de teledetección óptica en el cartografiado de hábitats bentónicos costeros. Asociación Española de Teledetección
- Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing [CRISP]. (2001). Interpretation of Optical Images. https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/opt_int.htm
- Citizen Science Earth Observation Lab. (s.f.). ESA SNAP (Sentinel Application Platform). European Space Agency. <https://cseol.eu/csdk/esa-snap-sentinel-application-platform-tutorials-and-technical-guides/>
- Clark, P. y Rilee, M. (2010). Remote Sensing Tools for Exploration [Herramientas de Sensado Remoto para Exploración]. Springer.
- Copernicus. (s.f.). What is Copernicus. Emergency Management Service – Mapping. <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/what-copernicus#:~:text=The%20objective%20of%20Copernicus%20is,the%20security%20of%20every%20citizen.>
- Copernicus. (2018). Fundamentos de teledetección aplicada. Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana, Gobierno de España.
- Dall'Olmo, G., Gitelson, A., Moses, W., Rundquist, D., Barrow, T., Fisher, T., Gurlin, D. y Holz, J. (2008). A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. Remote Sensing of Environment, 112, 3582-3593.

- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., & Moreno, J. (2011). Evaluation of sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11(7), 7063-7081.
- Delegido, J., Urrego, P., Vicente, E., Sòria-Perpinyà, X., Soria, J. M., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Peña, R. & Moreno, J. (2019). Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana. *Revista de Teledetección*, (54), 15-24.
- Dogliotti, A., Gossn, J., Vanhellemont, Q. y Ruddick, K. (2018). Detecting and Quantifying a Massive Invasion of Floating Aquatic Plants in the Río de la Plata Turbid Waters Using High Spatial Resolution Ocean Color Imagery. *Remote Sensing*, 10, 1140.
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W. y Li, X. (2016). Water bodies mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band.
- Earth Observing System [EOS] (s.f.). Normalized Difference Water Index. <https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/>
- European Space Agency [ESA]. (s.f.). Key dates 1960-2018. https://www.esa.int/About_Us/ESA_history/Key_dates_1960-2018
- ESA. (s.f.-a). The Sentinel Missions. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions
- ESA. (s.f.-b). The Sentinel Missions. Sentinel Application Platform (SNAP). Science Toolbox Exploitation Platform. <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>
- ESA. (s.f.-c). Technical Guide Overview. Sentinel Online. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/sentinel-technical-guides>
- ESA. (2014). Firmas espectrales. Eduspace. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html
- ESA. (2014a). Interferencia atmosférica. Eduspace. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMPPYD3GXF_0.html
- ESA. (2019). Sentinel-2 Atmospheric Correction. EO science for society. <https://eo4society.esa.int/projects/sentinel-2-atmospheric-correction/>
- ESA. (2021a). Sentinel Missions. Sentinel Online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>
- ESA. (2021b). Sentinel-2. Sentinel Online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- ESA. (2021c). Sentinel-2 MSI User Guide. Sentinel Online. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
- ESA. (2021d). Sentinel-3. Sentinel Online. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3>

- ESA. (2021e). Sentinel-3 OLCI User Guide. Sentinel Online. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci>
- ESA. (2021f). Sentinel-3 SLSTR User Guide. Sentinel Online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr>
- ESA. (2021g). Sentinel-3 SLSTR Technical Guide <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr>
- ESA. (2022). Centro de Acceso Abierto de Copernicus [Copernicus Open Access Hub]. Copernicus. <https://scihub.copernicus.eu/>
- Fondriest Environmental. (2013). pH of Water. Fundamentals of Environmental Measurements. <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/ph/>
- García, C., Henríquez, D. y Moz, G. (2013). Simulación de la hidrodinámica y de comportamiento diario del oxígeno disuelto en el embalse Cerrón Grande. Universidad Centroamericana José Simón Cañas, El Salvador.
- García, R., Feams, P., Keesing, J. y Liu, D. (2013). Quantification of floating macroalgae blooms using the scaled algae index. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 118, 26-42.
- Gitelson, A. A., Dall'Olmo, G., Moses, W., Rundquist, D. C., Barrow, T., Fisher, T. R., Gurlin, D. & Holz, J. (2008). A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3582-3593.
- Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab (22 de marzo de 2021) Landsat 9 Atmospheric Correction. NASA, Conceptual Image Lab. <https://svs.gsfc.nasa.gov/20340>
- Hernández, W. (2005). Nacimiento y Desarrollo del río Lempa. Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Servicio Geológico.
- Jiménez, I. y Sánchez, L. (2004). Embalse Cerrón Grande. Propuesta de Sitio Ramsar. MARN/Agencia Española de Cooperación Internacional.
- Kutterolf, S., Schindlbeck-Belo, J., Rohr, I., Rademacher, M., Cisneros, A., Eisele, S., Freundt, A. y Wang, K. (2020). The Arce Tephra: Two subsequent paroxysmal Plinian eruptions from Coatepeque Caldera (El Salvador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 390, 106673.
- Kyryliuk, D. y Kratzer, S. (2019). Evaluation of Sentinel-3A OLCI Products Derived Using the Case-2 Regional CoastColour Processor over the Baltic Sea. *Sensors*, 19, 3609.
- Labrador, M., Évora, J. y Arbelo, M. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.

- Layden, A., Merchant, C. y MacCallum, S. (2015). Global climatology of surface water temperatures of large lakes by remote sensing. *International Journal of Climatology*, 35, 4464-4479.
- Lee, Z., Shang, S., Hu, C., Du, K. Weidemann, A., Hou, W., Lin, J. y Lin, G. (2015). Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility. *Remote sensing of environment*, 169, 139-149.
- Lyu, H., Yang, Z., Shi, L., Li, Y., Guo, H., Zhong, S., Miao, S., Bi, S. & Li, Y. (2020). A novel algorithm to estimate phytoplankton carbon concentration in inland lakes using Sentinel-3 OLCI images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(9), 6512-6523.
- Matthews, M. (2011) A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 32:21, 6855-6899.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.* 1996, 17, 1425–1432.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. (2018). *Inventario Nacional de Humedales*, El Salvador.
- Milczarek, M., Robak, A. y Gadawska, A. (2016). Sentinel water mask (SWM), new index for water detection on sentinel-2 images. Crisis Information Centre at Space Research Centre, Polish Academy of Sciences.
- Mobley, C. D. (1999). Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied optics*, 38(36), 7442-7455.
- Mobley, C., Boss, E., & Roesler, C. (2020). *Ocean Optics Web Book*. <https://oceanopticsbook.info/>
- Moore, G. (1979). What is a picture worth? A history of remote sensing. *Hydrological Sciences Bulletin*.
- Naciones Unidas. (s.f.). Aplicación de datos del mes: Monitoreo de la calidad del agua. <https://www.un-spider.org/es/enlaces-y-recursos/fuentes-de-datos/daotm-monitoreo-calidad-agua>
- National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (2021). What is Remote Sensing. Earth Data. <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (26 de febrero de 2021). What is Remote sensing. National Ocean Service [NOS]. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html>
- NOAA. (2021a). OLCI Chlorophyll-a. Coast Watch, East Coast Regional Node, NOS. https://eastcoast.coastwatch.noaa.gov/cw_olci_chl.php
- NOAA. (2021b). OLCI Total Suspended Matter (TSM). Coast Watch, East Coast Regional Node, NOS. https://eastcoast.coastwatch.noaa.gov/cw_olci_tsmnn.php

- OmniSci. (2021). Remote Sensing. <https://www.omnisci.com/technical-glossary/remotesensing>
- Ormeño, S. (2006). Teledetección Fundamental. (3a ed.). Universidad Politécnica de Madrid.
- Peterson, K., Sagan, V. y Sloan, J. (2020). Deep learning-based water quality estimation and anomaly detection using Landsat-8/Sentinel-2 virtual constellation and cloud computing. *GIScience & Remote Sensing*
- Pullinger, C. (1998). Evolution of the Santa Ana volcanic complex, El Salvador. Doctoral dissertation, Michigan Technological University.
- Python Software Foundation (2022). What is Python? Executive Summary. <https://www.python.org/doc/essays/blurb/>
- Radin, C., Soria-Perpinya, X. y Delegido, J. (2020). Estudio multitemporal de calidad del agua del embalse de sitjar (Castello, España) utilizando imagenes Sentinel-2. *Revista de teledetección*, 56, 117-130.
- Rovira, M., Ortez, J., Morán, L., Arévalo, G., Franco, J. y Linares, D. (2020). Establecimiento de línea base para la identificación de Cianobacterias potencialmente toxicas del Embalse Cerrón Grande. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA).
- Rubin, H., Lutz, A., Steele, B., Cottingham, K., Weathers, K., Ducey, M., Palace, M., Johnson, K. y Chipman, J. (2021). Remote Sensing of Lake Water Clarity: Performance and Transferability of Both Historical Algorithms and Machine Learning. *Remote Sensing*, 13, 1434.
- Ruiz, A., Hoyos, C., Dominguez, J. y Peña, R. (2003). Estudio de la composición del fitoplancton en embalses españoles mediante teledetección. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
- Scolamacchia, T., Pullinger, C., Caballero, L., Montalvo, F., Orosco, L. y Hernández, G. (2009). The 2005 eruption of Ilimatepec (Santa Ana) volcano, El Salvador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(3-4), 291-318.
- Scottish Earth Observation Service. (s.f.). Introduction to Remote Sensing, Resolution. <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c03-p05.html>
- Sentinel-Hub. (s.f.). Normalized difference vegetation index. Custom-scripts. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndvi/>
- Sentinel-Hub. (s.f.-b). Normalized difference water index. Custom-scripts. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndwi/>
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales [SNET]. (s.f.). Escenarios de Amenaza Volcánica Volcán de Santa Ana o Ilimatepec. <http://mapas.snet.gob.sv/geologia/vulcanologia/descripiconVSA.htm>
- Siddiqui, M., Zaidi, A. y Abdullah, M. (2019). Performance Evaluation of Newly Proposed Seaweed Enhancing Index (SEI). *Remote Sensing*, 11, 1434.

- SNET. (2005) Balance Hídrico Integrado y Dinámico en El Salvador. Servicio Hidrológico Nacional.
- Teodoro, A. (2016). Optical Satellite Remote Sensing of the coastal zone environment. University of Porto, Portugal.
- United States Geological Survey [USGS]. (s.f.). USGS EROS Archive - Sentinel-2. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- USGS. (s.f.-b). pH and Water. Water Science School. https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/ph-and-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- USGS. (2018). Watercolor. Water Science School. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-color#:~:text=The%20water%20is%20in%20fact,for%20the%20sky%20being%20blue.>
- Young, H. y Freedman, R. (2009). Física Universitaria. (12a ed., Vol. 2). Pearson Educación.
- Zhuge, X., Zou, X. y Wang, Y. (2017). A Fast Cloud Detection Algorithm Applicable to Monitoring and Nowcasting of Daytime Cloud Systems. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 55, 11.