

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Química

Carrera de Ingeniería Ambiental

Teledetección para la evaluación de particulado y clorofila en el Río Tortuguero.

Fabiola Solano Cerdas

Cartago, Junio 2023.

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

ingeniería
ambiental

“Teledetección para la evaluación de particulado y clorofila en el Río Tortuguero”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura.

Miembros del tribunal

MSc. Laura Hernández Alpízar
Directora

MSc. Iván Ávila Pérez
Lector 1

MSc. Casia Soto Montoya
Lector 2

Dra. ir. Mary Luz Barrios Hernández
Coordinadora COTRAFIG

M.G.A. Ricardo Coy Herrera
Director Escuela de Química

MSc. Diana Alejandra Zambrano Piamba
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

*“El ayer es historia, el mañana es un misterio,
el hoy es un regalo, por eso se llama presente”*

-Eckhart Tolle

Dedicada a mami

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá por ser mi apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, por todo su amor y esfuerzo, por ser mi todo. También a mi tía Jacque por todo su apoyo, así como a mi abuelito Raúl que ya no está conmigo y le debo gran parte de quien soy.

Toda mi gratitud hacia la Profesora Laura Hernández, quien fue mi mayor guía en este proceso y siempre estuvo anuente a compartir su conocimiento conmigo.

Muchas gracias al Laboratorio PRIAS del Centro Nacional de Alta Tecnología por todo el apoyo brindado, especialmente a Iván Ávila, quien fue mi principal guía de parte del CeNAT y demostró su apoyo en todo momento. También agradecerle a Heeilen Aguilar por su apoyo y compañía durante las giras y a Christian Vargas por toda su ayuda en trámites administrativos.

Gracias al Área de Conservación Tortuguero por recibimos en sus instalaciones y toda su anuencia durante las giras, especialmente a Jeffry Castillo. Además, agradecerle a Javier, quien fue nuestro botero en ambas giras y nos permitió conocer más a fondo el lugar de estudio.

Gracias al Instituto Tecnológico de Costa Rica y en especial a los profesores y profesoras de la Carrera de Ingeniería Ambiental por todos los conocimientos adquiridos. A la profesora Casia Soto, quien con su apoyo me mostró el mundo de los Sistemas de Información Geográfica y puso a mi alcance las herramientas necesarias.

Finalmente, muchas gracias a todas las personas con las que tuve la oportunidad de compartir este proceso y de paso establecer una amistad, especialmente a Luis, Rodrigo, Nicolás, Ana Victoria y Ariadna, quien fue mi principal compañera y amiga en esta etapa.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN	14
4. OBJETIVOS	15
4.1. OBJETIVO GENERAL	15
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
5. MARCO TEÓRICO	16
5.1. TELEDETECCIÓN	16
5.1.1. <i>Introducción y fundamentos físicos</i>	16
5.1.2. <i>Firma Espectral</i>	17
5.1.3. <i>Sistema Sensor</i>	19
5.1.4. <i>Las órbitas satelitales</i>	20
5.1.5. <i>Principales programas de teledetección</i>	21
5.1.6. <i>Análisis digital de las imágenes</i>	23
5.2. APLICACIONES AMBIENTALES	24
5.2.1. <i>Parámetros de calidad del agua</i>	25
5.2.2. <i>Índice Holandés</i>	27
5.3. PROGRAMAS DE PROCESAMIENTO	28
5.3.1. <i>Water Colour Simulation (WASI)</i>	28
5.3.2. <i>The Environment for Visualizing Images (ENVI)</i>	29
5.3.3. <i>The Sentinel Application Platform (SNAP)</i>	30
5.3.4. <i>Quantum GIS (QGIS)</i>	30
5.4. PARQUE NACIONAL TORTUGUERO	30
6. LA CONTRIBUCIÓN DE LA TELEDETECCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	31
7. METODOLOGÍA	33
7.1. LUGAR DE ESTUDIO	33
7.2. TOMA DE DATOS	34
7.3. PRESUPUESTO	37
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
8.1. GIRA 1 (ÉPOCA LLUVIOSA, JULIO 2022)	39
8.1.1. <i>Resultados de la modelación en época lluviosa</i>	39
8.1.2. <i>Validación con los resultados de análisis en el sitio y de laboratorio</i>	41
8.2. GIRA 2, (MARZO 2023, ÉPOCA SECA)	46
8.2.1. <i>Resultados de la modelación en época seca</i>	46
8.2.2. <i>Validación con los resultados obtenidos en el sitio y en el laboratorio</i>	48
8.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ÉPOCA LLUVIOSA Y ÉPOCA SECA	53
8.4. ANÁLISIS RETROSPECTIVO	58

CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS.....	64
ANEXOS.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de órbitas de satélites de teledetección sobre la Tierra [9].....	16
Figura 2. Transmisividad relativa de la atmósfera terrestre [14].....	18
Figura 3. Localización de las 13 bandas del sensor MSI en el espectro electromagnético [23].....	22
Figura 4. Ubicación del Área de Conservación Tortuguero, Limón, Costa Rica. Elaboración propia.....	31
Figura 5. Puntos de muestreo, Tortuguero, Limón, Costa Rica. Elaboración propia.....	34
Figura 6. Equipo para la medición del espectro de reflectancia medido en el sitio . (Construido en PRIAS, CeNAT.)	36
Figura 7. Toma de firma espectral en el sitio.	37
Figura 8. Espectro de reflectancia modelado y medido en los puntos seleccionados (a), (b), (c), (d) del río Tortuguero en época lluviosa. (a) y (b) muestran el espectro de reflectancia de mayor intensidad de la población de sitios examinados. El eje X corresponde a la longitud de onda en nanómetros y el eje Y corresponde a la reflectancia en unidades sr-1 de reflectancia. La línea azul es la firma espectral medida y la línea roja, la curva de mejor ajuste, es decir, el espectro modelado.....	39
Figura 9. Espectro de reflectancia modelado y medido en los puntos seleccionados (e), (f), (g), (h), (i), (j) del río Tortuguero, época lluviosa. En todos los sitios se observa una baja intensidad asociada con baja concentración de clorofila y particulado suspendido. El eje X corresponde a la longitud de onda en nanómetros y el eje Y corresponde a la reflectancia en unidades sr-1 de reflectancia. La línea azul es la firma espectral medida y la línea roja, la curva de mejor ajuste, es decir, el espectro modelado.....	40
Figura 10. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con los datos de la gira en época lluviosa, para sólidos suspendidos (izquierda) y clorofila (derecha). Elaborado con el programa WASI.....	45
Figura 11. Espectro de reflectancia modelado y medido en los puntos seleccionados (a), (b), (c), (d) del río Tortuguero, época seca. (a), (b) y (c) corresponden a los sitios de muestreo con el espectro de reflectancia de mayor intensidad de la población de puntos examinados. El eje X corresponde a la longitud de onda en nanómetros (nm) y el eje Y corresponde a la reflectancia en unidades sr ⁻¹ . La línea azul es la firma espectral medida y la línea roja, el espectro modelado.	46

Figura 12. Espectro de reflectancia modelado y medido en los puntos seleccionados (e), (f), (g), (h), (i), (j) del río Tortuguero, época seca. En los puntos (e), (f), (g), (h), (i), (j) se observa una baja intensidad asociada con baja concentración de clorofila y particulado suspendido. El eje X corresponde a la longitud de onda en nanómetros (nm) y el eje Y corresponde a la reflectancia en unidades sr^{-1} . La línea azul es la firma espectral medida y la línea roja, el espectro modelado.	47
Figura 13. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos en época seca, para sólidos suspendidos (izquierda) y clorofila (derecha). Elaborado con el programa WASI.	53
Figura 14. Concentración de Sólidos Suspendidos obtenida mediante análisis de laboratorio en época lluviosa y época seca.	54
Figura 15. Concentración de Sólidos Suspendidos obtenida mediante modelación espectral utilizando el programa WASI en época lluviosa y época seca.	55
Figura 16. Concentración de Clorofila-a obtenida mediante el análisis de laboratorio en época lluviosa y época seca.	56
Figura 17. Concentración de Clorofila-a obtenida mediante modelación espectral utilizando el programa WASI en época lluviosa y época seca.	57
Figura 18. Turbiedad obtenida mediante análisis de laboratorio en época lluviosa y época seca.	58
Figura 19. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos de julio 2019, para clorofila (izquierda) y sólidos suspendidos (derecha). Elaborado con el programa WASI.	59
Figura 20. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos de agosto 2020, para clorofila (izquierda) y sólidos suspendidos (derecha). Elaborado con el programa WASI.	59
Figura 21. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos de julio 2021, para clorofila (izquierda) y sólidos suspendidos (derecha). Elaborado con el programa WASI.	60
Figura 22. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos de enero 2022, para clorofila (izquierda) y sólidos suspendidos (derecha). Elaborado con el programa WASI.	60

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros complementarios para la determinación de la calidad de aguas de cuerpos superficiales para las clases establecidas en el Reglamento N.º 33903-MINAE....	27
Cuadro 2. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores.....	28
Cuadro 3. Tipos de espectro y sus principales opciones de cálculo.....	29
Cuadro 4. Contribución de la teledetección a los ODS.....	32
Cuadro 5. Metodologías empleadas en análisis de laboratorio.	35
Cuadro 6. Descripción del presupuesto utilizado durante la investigación en el río Tortuguero.....	38
Cuadro 7. Resultados de análisis en el laboratorio, río Tortuguero (gira del 29/07/2022). .	41
Cuadro 8. Resultados de análisis en el sitio, río Tortuguero (gira del 29/07/2022).	42
Cuadro 9. Resultados obtenidos por modelación de la concentración de sólidos suspendidos y clorofila y error asociado con respecto a los resultados de laboratorio (gira del 29/07/2022).....	43
Cuadro 10. Resultados de análisis realizados en el sitio, río Tortuguero (17/03/2023).....	49
Cuadro 11. Resultados obtenidos en los análisis de laboratorio de las muestras. río Tortuguero (17/03/2023).	50
Cuadro 12. Resultados obtenidos por modelación de la concentración de sólidos suspendidos y clorofila, y error asociado con respecto a los resultados de laboratorio (gira 17/03/23).....	51
Cuadro 13. Comparación de datos de profundidad tomados en el sitio en época lluviosa y seca, en el río Tortuguero.	54

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACTo	Área de Conservación Tortuguero
CeNAT	Centro Nacional de Alta Tecnología
DLR	Agencia Aeroespacial Alemana
ENVI	The Environment for Visualizing Images
ESA	European Space Agency
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MONEO	Monitoring the Neotropical Environment Through Earth Observation
MSI	Multispectral Instrument
ND	Nivel Digital
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OECD	Programa Internacional para la Organización, Cooperación y Desarrollo Económico de aguas interiores
OLI	Operational Land Imager
PNT	Parque Nacional Tortuguero
QGIS	Quantum GIS
RADAR	Radio Detection And Ranging
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
SNAP	The Sentinel Application Platform
SST	Sólidos Suspendidos Totales
TIRS	Thermal Infrared Sensor
USGS	United States Geological Survey
WASI	Water Colour Simulation

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grado Celsius
μm	Micrómetro
μg/L	Microgramo por Litro
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
m	Metro
mg/m³	Miligramo por metro cúbico
mg/L	Miligramo por Litro
nm	Nanómetro
pH	Potencial de Hidrogeno
sr⁻¹	Unidades de Reflectancia
UTN	Unidades de Turbiedad

Resumen

La modelación de parámetros de calidad ambiental con ajuste de funciones para datos satelitales de reflexión de la radiación es una técnica que permite visualizar variaciones y dar seguimiento a cambios en grandes áreas de la superficie terrestre. En este trabajo se estudió la aplicación de esta metodología al modelaje de particulado y clorofila en el Río Tortuguero en Costa Rica, una región tropical de alta nubosidad. El modelaje se efectuó por aproximación de la firma espectral de datos satelitales del programa Sentinel-2 con corrección de la firma espectral tomada en el sitio. Para la modelación se utilizó el programa Water Colour Simulation (WASI). Los resultados fueron evaluados con el análisis de muestras colectadas en el sitio. Se encontró una buena correlación de la tendencia en las dos épocas efectuadas de muestreo, sin embargo, se encuentra una sobreestimación cuantitativa de los valores. Aun así, los valores obtenidos en los sitios analizados muestran condiciones estables y normales para el humedal.

Palabras clave: teledetección, calidad del agua, clorofila, sedimentos, Sentinel-2, WASI, agua superficial.

Abstract

Modeling of environmental quality parameters with function fitting for radiation reflection satellite data is a technique that allows visualizing variations and monitoring changes over large areas of the Earth's surface. In this study, the application of this methodology to the modeling of particulates and chlorophyll in the Tortuguero River in Costa Rica, a tropical region of high cloudiness, was studied. The modeling was carried out by approximation of the spectral signature of satellite data from the Sentinel-2 program with correction of the spectral signature taken at the site. For modeling, the Water Color Simulation (WASI) program was used. The results were compared with the analysis of samples collected at the site. A good correlation of the trend was found in the two sampling periods, however, there is a quantitative overestimation of the values. Even so, the values obtained in the analyzed sites show stable and normal conditions for the wetland.

Keywords: remote sensing, water quality, chlorophyll, sediments, Sentinel-2, WASI, surface water.

1. Introducción

Entre los principales usos de la teledetección se encuentra el potencial para modelar y dar seguimiento a procesos que se producen en una región de la superficie terrestre e incluso observar su evolución en el tiempo. Esto es viable debido a la información que recolecta un sensor situado a bordo de un satélite en órbita que toma datos de la interacción de la superficie con la radiación que le impacta, de manera sistemática, cada cierto periodo de tiempo y en la misma zona [1].

El seguimiento de la calidad del recurso hídrico es una de las aplicaciones de esta metodología, y es de alta importancia en ecosistemas acuáticos como el río Tortuguero, dentro del Parque Nacional Tortuguero (PNT), Costa Rica, que es un sistema hídrico tipo humedal. Los humedales son primordiales para el desarrollo de la vida en un territorio por la variedad de servicios ecosistémicos que brindan, así como por su rol fundamental en la limpieza del ciclo hidrológico [2]. Tortuguero fue declarado Parque Nacional en 1970, se ubica al noreste del territorio costarricense y es uno de los iconos turísticos de Costa Rica [3]. Debido a que el PNT es un paraíso para la investigación y el ecoturismo, resulta de gran importancia la constante realización de análisis ambientales, como lo son las pruebas de calidad de sus aguas.

En la calidad de un cuerpo de agua superficial se encuentran algunos parámetros indicadores de su estado como son la densidad de algas y la materia en suspensión [4]. La densidad de algas se asocia a la presencia de clorofila, que permite realizar fotosíntesis, y que en exceso puede dar señal de un proceso en curso de eutrofización o del estado trófico del cuerpo de agua. La materia en suspensión determina la turbidez del agua, dispersando o absorbiendo luz solar en vez de transmitirla, disminuyendo así la capacidad de fotosíntesis de las algas y otros procesos que aseguran la capacidad y salud acuática de los ecosistemas [5]. Ambos parámetros de calidad del agua han sido profusamente estimados con imágenes ópticas satelitales [6].

En esta investigación se utiliza y valida la estimación de particulado y clorofila en el trayecto del río Tortuguero, mediante la modelación de funciones espectrales con datos satelitales de reflexión de la radiación por el cuerpo de agua.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Establecer un perfil de concentración de clorofila y particulado en el agua del río Tortuguero con el uso de datos satelitales.

4.2. Objetivos Específicos

- Ajustar los parámetros espectrales relacionados con las variables estudiadas utilizando el software WASI.
- Validar el modelo con datos de campo.
- Analizar los parámetros retrospectivamente mediante la función ajustada y los históricos de los datos satelitales.

5. Marco Teórico

5.1. Teledetección

5.1.1. Introducción y fundamentos físicos

La teledetección puede ser definida como una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos a través de la reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial [7]. Esta metodología se basa en mediciones de energía electromagnética, las cuales pueden ser descritas en términos de velocidad, longitud de onda y frecuencia [8].

La teledetección también conocida como sistemas de sensores remotos, contempla tres partes: los objetos o fenómenos de una región a investigar, las mediciones realizadas con detectores de radiación electromagnética por detectores de sensores remotos transportados por satélite (aviones o drones) y el análisis e interpretación de datos de teledetección [9].

Los satélites se colocan en órbitas sincrónicas con el sol de modo que cruzan todos los lugares de la Tierra o en órbitas geoestacionarias que se mantienen sobre un punto en la Tierra [9]. En la Figura 1 se puede observar gráficamente el funcionamiento de los satélites alrededor de la Tierra.

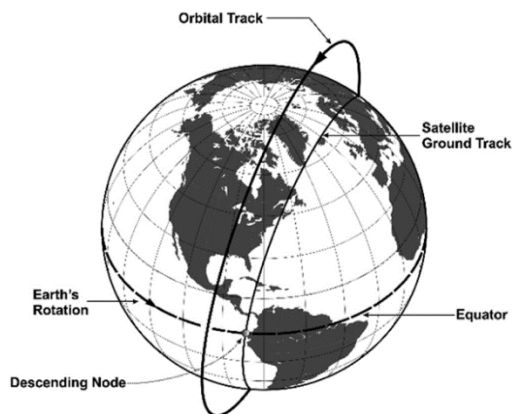


Figura 1. Ejemplo de órbitas de satélites de teledetección sobre la Tierra [9].

La manera en que se genera la interacción con la superficie va a depender de cada sensor, estableciéndose un flujo por (I) reflexión cuando el sensor capta un flujo energético proveniente del Sol reflejado por la superficie terrestre, por (II) emisión cuando un dispositivo situado en la superficie emite una señal al espacio y es captada por el sensor, y finalmente, (III) reflexión-emisión cuando es el propio sensor quien emite y capta la onda una vez reflejada en el objeto que se pretende estudiar [7]. En cualquiera de los tres casos mencionados, el flujo energético constituye una forma de radiación electromagnética transmitida por radiación [10].

La radiación electromagnética es la propagación de la energía a través del espacio en forma de ondas [11], y el espectro electromagnético es el rango completo de todas estas radiaciones [12], que se expresan en función ya sea de la longitud de onda o de la frecuencia que es inversamente proporcional a la longitud de onda de la energía electromagnética propagada, donde se tiene que a menor longitud de onda mayor frecuencia y viceversa [13].

5.1.2. Firma Espectral

El sistema de teledetección espacial comprende como mínimo cinco elementos que interaccionan entre sí, los cuales son; la fuente de energía, la cubierta terrestre, el sistema sensor, el intérprete y el usuario final [7]. El sol es la principal fuente de energía de nuestro planeta, por lo que reconocer la interacción de su energía con la atmósfera y de los diferentes elementos que constituyen a la superficie terrestre, es primordial para lograr diferenciar todo tipo de elemento evitando equivocaciones [14]. Cada tipo de superficie interactúa con la radiación de manera diferente, absorbiendo unas longitudes de onda concretas y reflejando otras en unas proporciones determinadas; lo cual se conoce como firma espectral [15]. Cada elemento, respondiendo a su composición química; reflejará, transmitirá y absorberá la energía solar de una manera única. Lo cual ha permitido la existencia de bancos de dichas firmas, donde se relaciona cada firma con el determinado elemento en cuestión, facilitando de gran manera el trabajo [14].

Sin embargo, aunque cada elemento tenga una firma espectral única, hay elementos que alteran el comportamiento espectral teórico esperado, los cuales son; los ángulos de iluminación y observación, las elevaciones o depresiones en el relieve, las variaciones atmosféricas, la variación ambiental de cubierta y el sustrato litológico [7].

Los gases presentes en la atmósfera absorben gran cantidad de radiación electromagnética, impidiendo que esta incida sobre la superficie terrestre [16]. Para lograr observar la superficie terrestre con precisión empleando la teledetección, los sensores están diseñados para captar las fracciones del espectro donde la atmósfera presenta una menor absorción y permite de esta manera una mejor transmisión de la energía. Las regiones del espectro donde se produce una mayor transmisión de energía a través de la atmósfera se les denomina ventanas atmosféricas [14]. En la Figura 2, se muestran las principales ventanas atmosféricas con su respectiva ubicación en el espectro electromagnético

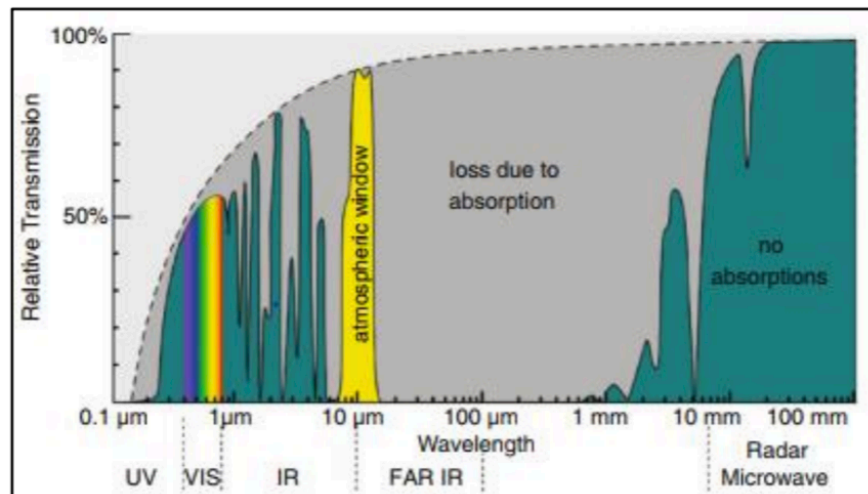


Figura 2. Transmisividad relativa de la atmósfera terrestre [14].

Numéricamente las ventanas atmosféricas mostradas se ajustan a los siguientes valores:

- Espectro visible e infrarrojo cercano: entre 0,3 y 1,35 μm.
- Infrarrojo medio: de 1,5 a 1,8 μm; de 2 a 2,9 μm y de 4,5 a 5,5 μm.
- Infrarrojo lejano: entre 8 y 14 μm.
- Microondas: por encima de los 20 μm.

Los sensores a bordo de las plataformas espaciales se diseñan de acuerdo a estas ventanas para reducir las interferencias atmosféricas. Además, junto a las interferencias, las nubes constituyen un obstáculo importante en el campo de la observación terrestre, debido a que absorben todo el espectro impidiendo la transmisión de energía entre superficie y sensor [17].

5.1.2.1. Firma Espectral del agua

El agua empieza a absorber radiación debido a los componentes que se encuentran en ella, aumentando así su capacidad de absorción conforme aumenta la longitud de onda. De manera tal que la mayor reflectividad del agua se produce en torno al azul ($0,4 \mu\text{m}$) volviéndose prácticamente nula en el infrarrojo y a mayores longitudes de onda [18].

La variabilidad del agua es más fácil de detectar en longitudes de onda corta, debido a que la profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad procedente de los materiales de los fondos, incrementando la reflectividad en aguas poco profundas [18].

Respecto a la composición del agua y la detección de materiales en suspensión, varios estudios han validado la posibilidad de emplear sensores espaciales para cartografiar el contenido de clorofila en el agua. Estos estudios señalan que, con un aumento de la concentración de clorofila, aumenta la reflectividad del agua en el verde y disminuye el azul, estableciendo una correlación del signo negativo entre ambas componentes. Este descubrimiento ha facilitado la localización de concentraciones de algas a poca profundidad, además de estudiar y seguir los procesos de embalses y lagunas [11].

5.1.3. Sistema Sensor

El sistema sensor está compuesto por el propio sensor y la plataforma que lo reside; es el encargado de captar la información de la superficie terrestre y codificarla, de manera tal que esta pueda ser posteriormente transmitida [7]. Actualmente se identifican dos tipos de sensores dependiendo de la condición en la que captan la información de la superficie terrestre. A continuación, se describen ambos de manera sintetizada [19]:

- **Sensores pasivos:** Captan la energía electromagnética procedente de la cubierta terrestre, ya sea producto de la reflexión de los rayos solares o emitida desde focos a elevada temperatura y cuentan con una sensibilidad espectral que permite obtener simultáneamente información de diferentes bandas espectrales. Por ejemplo, los sistemas fotográficos, radiométricos multi e hiperespectrales y los espectrómetros de imagen son sensores pasivos.
- **Sensores activos:** La característica común que los relaciona es la posibilidad que tienen para emitir un haz energético, que posteriormente captan tras su reflexión sobre la superficie que se pretende reconocer. La característica de la onda electromagnética reflejada corresponde con la reflectividad de la superficie estudiada. Esta tecnología se usa principalmente en los sistemas RADAR (Radio Detection And Ranging) y LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging).

5.1.4. Las órbitas satelitales

Para realizar observaciones de la Tierra desde el espacio, el sensor que capta las imágenes o grupos de datos tiene que estar ubicado en una plataforma espacial [16]. A continuación, se detallan algunos tipos de orbitas que adopta un satélite alrededor de la Tierra y los fenómenos físicos que actúan para que esta sea estable [20].

- **Órbitas geoestacionarias:** Son aquellas en que la velocidad orbital del satélite converge con la velocidad de rotación de la Tierra, moviéndose simultáneamente con ella. Este hecho aporta la ventaja de que el satélite siempre ve la tierra desde la misma perspectiva, registrando la imagen de la misma superficie en breves intervalos de tiempo. El mayor inconveniente radica en la lejanía del satélite respecto a la Tierra, generando una disminución de la resolución.
- **Órbitas heliosíncronas:** Debido a que muchos satélites están tripulados con sensores pasivos, que demandan de la reflexión de la luz solar para su funcionamiento, sus

orbitas se tienen que ajustar al día y la noche. Estos satélites especialmente aplicados en la monitorización de los recursos naturales, requieren que, para realizar una comparación efectiva, las imágenes se tomen bajo las mismas condiciones de luz. Dicha condición obliga a tomar los registros a la misma hora local del día para que la latitud del Sol sobre el horizonte sea siempre la misma, es decir el plano orbital gira a la misma velocidad que la Tierra alrededor del Sol.

5.1.5. Principales programas de teledetección

Los satélites de observación terrestre se diferencian en función de la órbita que describen, los diferentes tipos de resolución y la amplitud del barrido de los sensores sobre la superficie [19].

Los principales programas de teledetección corresponden a inversión pública; sin embargo, debido a la gran viabilidad de la teledetección se han realizado inversiones privadas para la puesta en órbita de satélites comerciales. A continuación, se mencionan algunos de los satélites que podrían ser utilizados para la evaluación de la calidad del agua del río Tortuguero:

- *Misión Sentinel-2:*

Desarrollada por la European Space Agency (ESA), esta misión pretende desarrollar observaciones de la superficie terrestre para monitorizar la vegetación, el suelo y la cobertura de agua en la superficie y zonas costeras [21]. Los satélites de la misión Sentinel-2 están provistos con el sensor Multispectral Instrument (MSI), compuesto por 13 bandas espectrales; las cuales se describen a continuación [22]:

- Bandas de 10m de resolución espacial: azul-B2 (490 nm), verde-B3 (560 nm), rojo-B4 (665 nm) e infrarrojo cercano-B8 (842 nm).
- Bandas de resolución espacial igual a 20 m: B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8a (865 nm), B11 (1610 nm) y B12 (2190 nm).

- Bandas con 60m de resolución espacial: B1 (443 nm), B9 (940 nm) y B10 (1375 nm).

A continuación, en la Figura 3. se muestra gráficamente la distribución y amplitud de las 13 bandas del sensor MSI en el espectro electromagnético.

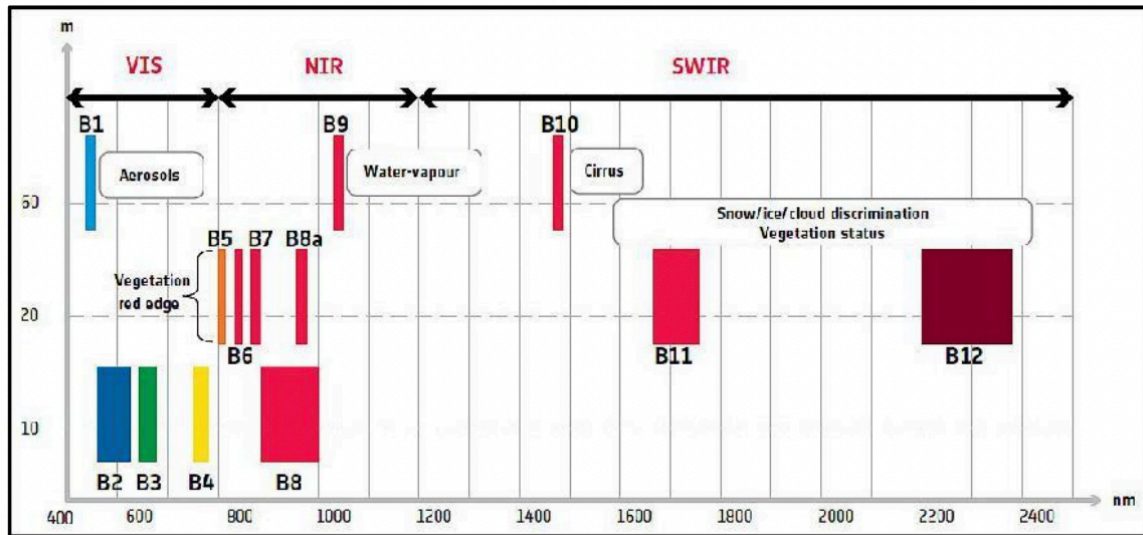


Figura 3. Localización de las 13 bandas del sensor MSI en el espectro electromagnético [23].

- *Misión Landsat-8* [24]:

Fue lanzado en un cohete Atlas-V desde la base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, el 11 de febrero del 2013. Landsat 8 es el satélite Landsat que lleva consigo dos elementos; Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS).

OLI es un sensor de barrido con telescopio de cuatro espejos y cuantificación de 12 bits, compila datos para las bandas espectrales; visible, infrarroja cercana e infrarroja de onda corta, así como para banda pancromática. Además, en correlación con Landsat-7, OLI proporciona dos nuevas bandas espectrales, una diseñada especialmente para detectar nubes y otra para observaciones de zonas costeras.

TIRS recopila datos para dos bandas espectrales más estrechas en la región térmica. Los datos TIRS de 100 m se registran en los datos OLI para plasmar productos de datos de 12 bits con corrección radiométrica y de terreno. Debido a que captura más de 725 escenas por día, hay una gran extensión en la probabilidad de capturar escenas sin nubes.

5.1.6. Análisis digital de las imágenes

En una imagen digital, el territorio observado se fracciona en una serie de parcelas, habitualmente cuadradas que corresponden al área instantánea observada en cada momento por el sensor. Estas parcelas constituyen la unidad mínima de información de la imagen y se denominan píxeles. Es decir, podemos identificar el píxel como cada uno de los pequeños cuadrados que componen una imagen, visibles cuando esta se amplía y el valor numérico que codifica cada píxel se denomina nivel digital (ND) [7].

5.1.6.1. Correcciones sobre la imagen

Con este nombre se señalan aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización o radiometría de los píxeles que la componen. Estas operaciones tienden a orientar los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea [7].

Las correcciones están orientadas a realizar una homogenización de la imagen y disminuir o eliminar las interferencias producidas por un funcionamiento anormal del sensor. Las fuentes más comunes de error en una imagen corresponden a [25]:

- Los producidos por los sensores.
- Los producidos por la interferencia atmosférica.
- Los producidos por el terreno.

Los errores de adquisición se deben al tipo radiométrico cuando afectan el ND de la imagen, siendo causados principalmente por la instrumentación utilizada y la interferencia

atmosférica. Se clasifican como errores geométricos aquellos que perjudican a la medida de la imagen, siendo producidos por la curvatura terrestre o por el desplazamiento descontrolado de la órbita de la plataforma en la que se encuentra el sensor.

Dentro de las principales distorsiones que estropean la calidad de las imágenes, se encuentran las siguientes:

- Distorsión radiométrica: Causada por aquellos procesos que afectan la medida de los valores de brillo que se representan en el píxel.
- Distorsión geométrica: Las principales causas por las que se presenta son el cabeceo (pitch), el albeo (roll) y el giro lateral (yaw); provocadas por la trayectoria, altura y velocidad de la plataforma que alberga el sensor. Además, hay que añadir también los errores producidos por el relieve y la forma terrestre.

5.1.6.2. Corrección atmosférica

La corrección atmosférica es un proceso que permite eliminar el efecto de aerosoles y la radiancia intrínseca presente en las imágenes digitales, ya que este efecto y la radiancia se introducen en el sensor y esto se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmosfera. El proceso de corrección atmosférica permite mejorar la calidad visual de la imagen y eliminar el componente intrusivo de la atmósfera [26].

5.2. Aplicaciones Ambientales

Los indicadores de calidad del agua contemplan propiedades físicas, químicas y biológicas; y se pueden determinar tradicionalmente recolectando muestras de campo y luego analizándolas en el laboratorio. Sin embargo, los métodos convencionales de muestreo in situ no pueden identificar con facilidad las variaciones espaciales o temporales en la calidad del agua, lo cual es indispensable para la evaluación y gestión integral de los cuerpos de agua [5]. Es por medio del progreso en la ciencia espacial y el uso cada vez mayor de aplicaciones informáticas, que las técnicas de teledetección se han convertido en herramientas útiles para lograr este objetivo, debido a que estas permiten monitorear e identificar regiones y masas de agua a gran escala.

5.2.1. Parámetros de calidad del agua

- Concentración de Clorofila

La evaluación de la concentración de clorofila se constituye como la medida de las algas y el fitoplancton que habitan el agua y que realizan actividad fotosintética. Los cambios del color en las aguas captados por los satélites de teledetección pueden ser estudiados y analizados de manera tal que se establezca una relación entre las imágenes tomadas en diferentes fechas, observando la evolución de las aguas y determinando de una manera cuantitativa mediante análisis estadísticos, la cantidad estimada de clorofila que poseen las aguas [27]. Esta técnica se apoya en el funcionamiento de la reflectividad de los pigmentos de clorofila en torno a 685 nm (valor de reflectividad), longitud de onda correspondiente en el espectro electromagnético a la coloración verde [16]. Una vez adquiridos los valores de reflectividad tanto del agua como de los pigmentos de clorofila, se procede a efectuar los cálculos pertinentes por medio de ecuaciones o sistemas computarizados que solo requieran de la colocación de datos para generar una respuesta.

La clorofila es un indicador del principal componente orgánico en suspensión de las aguas superficiales, debido a su relación con el fitoplancton. Absorbe especialmente la luz azul y roja dependiendo de la concentración. En zonas donde la concentración de nutrientes y fitoplancton es inferior, como en mar adentro, la radiancia emitida se representa sustancialmente por azules oscuros, debido a que, en la banda azul, entre menor sea la concentración, mayor la radiancia emitida. En el caso de aguas superficiales, en donde la concentración de nutrientes y de fitoplancton es mayor, la radiancia en la banda azul disminuye, sin embargo, en el espectro verde aumenta, y finalmente, para concentraciones muy altas de clorofila, la banda roja tiene mayor representatividad en términos de radiancia [28].

La clorofila se utiliza como indicador del estado de eutrofización del agua, lo cual en parte es atribuible al enriquecimiento de las aguas con nutrientes no puntuales, especialmente

fósforo y nitrógeno [29]. La eutrofización puede eventualmente controlarse evitando el aporte excesivo de nutrientes o compuestos de nitrógeno y fósforo con el uso de fertilizantes de preparación industrial, que pueden ingresar al cuerpo de agua a través de un proceso de escorrentía debido a la lluvia [30].

- Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los SST brindan información esencial para la evaluación de la calidad ambiental del agua [31]. La composición de los SST está estrechamente relacionada con la presencia de material detrítico y microorganismos que pueden perjudicar los procesos biogeoquímicos y la biodiversidad del río [32]. Sin embargo, para modelar la dinámica de sedimentación de los sedimentos y la contaminación difusa del agua puede ser poco práctico monitorear este indicador clave *in situ* debido al costo y tiempo que demanda el muestreo [33]. La tecnología de teledetección puede ser una opción idónea para elaborar dichas evaluaciones de la calidad del agua precisamente por su bajo costo y cobertura de territorio [34].

- Turbidez

La turbidez en el agua es producida por materia en suspensión y coloidal como arcilla, materia orgánica e inorgánica, plancton y otros organismos microscópicos. La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que hace que la luz se disperse y absorba en lugar de transmitirla sin cambios en la dirección o el nivel de flujo a través de la muestra [35].

Las imágenes satelitales pueden generar una vista clara del cuerpo de agua y se ha demostrado su conveniencia para el estudio de la turbidez, generando una relación con las concentraciones de sedimentos en suspensión [36]. De manera tal que la atenuación y dispersión de la luz, se traduciría en una firma espectral que podría ser interpretada por medio de programas que permiten el procesamiento de datos satelitales.

5.2.2. Índice Holandés

En el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales N° 33903-MINAE [37], se utiliza el Índice Holandés de Valoración de la Calidad del Agua para Cuerpos Receptores. En este documento se describen y fijan los parámetros complementarios para la determinación de la calidad de aguas de cuerpos superficiales para una serie de clases establecidas.

En los Cuadros 1 y 2 se muestran los parámetros de interés en esta investigación, con sus respectivos valores y clases.

Cuadro 1. Parámetros complementarios para la determinación de la calidad de aguas de cuerpos superficiales para las clases establecidas en el Reglamento N.º 33903-MINAE.					
Parámetros Complementarios (Unidades)	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Turbiedad (UNT)	<25	25 a <100	100 a 300	(1)	(1)
Temperatura (°C)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Potencial de hidrógeno (pH)	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,0 a 9,0	5,5 a 9,5	5,5 a 9,5
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	<10	10 a 25	25 a 100	100 a 300	>300
(1) Natural o que no afecte el uso indicado.					

Cuadro 2. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores.

Clase	Sumatoria Índice Holandés	Código de Color	Interpretación de Calidad
1	3	Azul	Sin contaminación
2	4-6	Verde	Contaminación incipiente
3	7-9	Amarillo	Contaminación moderada
4	10-12	Anaranjado	Contaminación severa
5	13-15	Rojo	Contaminación muy severa

5.3. Programas de procesamiento

5.3.1. Water Colour Simulation (WASI)

El programa WASI es un software de procesamiento de imágenes que permite simular y analizar las mediciones espectrales más comunes en aguas abiertas en condiciones exteriores [38].

WASI permite el análisis de datos multiespectrales e hiperespectrales de aguas oceánicas, costeras e interiores, además, este software puede importar imágenes corregidas atmosféricamente de sensores aéreos e instrumentos satelitales en varios formatos de datos y unidades, como la reflectancia de la teledetección. El usuario puede adaptarlo fácilmente a diferentes sensores y a las propiedades ópticas del área de estudio [39].

Todos los cálculos se basan en un modelo analítico de irradiancia descendente que permite modelar el reflejo del sol y el cielo en la superficie del agua en función de la longitud de onda. La base de datos proporcionada cubre el rango espectral de 350 a 1000 nm en intervalos de 1 nm. Puede intercambiarse fácilmente para representar las propiedades ópticas de los constituyentes del agua, los tipos de fondo y la atmósfera del área estudiada [39].

Este software fue utilizado en el Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), como parte del proyecto Monitoring the Neotropical Environment Through Earth Observation (MONEO), por el Laboratorio PRIAS.

WASI se puede utilizar para generar o analizar los espectros que se mencionan a continuación en el Cuadro 3.

5.3.2. The Environment for Visualizing Images (ENVI)

ENVI es un sistema de procesamiento de imágenes para datos provenientes de sensores remotos aerotransportados y de satélite. Es un software para la visualización, análisis y presentación de todo tipo de imágenes digitales. Incluye herramientas para análisis espectral, corrección geométrica, análisis de terreno, análisis de radar, gestión de información SIG, soporte de múltiples formatos y mucho más. El software comprende tres paquetes de herramientas generalizadas, dentro de los cuales se encuentran las herramientas de análisis espectral [40].

Cuadro 3. Tipos de espectro y sus principales opciones de cálculo.	
Tipo de Espectro	Opciones de modelo
Coeficiente de absorción	De los constituyentes del agua De las masas de agua naturales
Coeficiente de atenuación	Para irradiancia descendente
Reflectancia especular	Dependiendo de la longitud de onda Constante
Reflectancia de la irradiación	Para aguas profundas Para aguas poco profundas
Reflectancia de la radiación	Debajo de la superficie para aguas profundas Debajo de la superficie para aguas poco profundas Sobre la superficie para aguas profundas Sobre la superficie para aguas poco profundas
Reflectancia inferior	Para sensores de irradiancia Para sensores de radiación
Irradiación descendente	Encima de la superficie

	Debajo de la superficie
Resplandor aflorante	Debajo de la superficie Encima de la superficie

5.3.3. The Sentinel Application Platform (SNAP)

Las imágenes Sentinel tienen la viabilidad de ser procesadas con un programa que se ha desarrollado especialmente para ellas, llamado SNAP, de uso gratuito.

El programa ha diseñado el componente Sen2Cor como herramienta que ofrece excelentes resultados en la corrección atmosférica y geométrica de los datos de los satélites Sentinel. Esto es fundamental cuando se requiere trabajar con imágenes liberadas con alteraciones atmosféricas o presencia de nubes, proceso necesario en algunos estudios como los de análisis multitemporales o la comparación de índices de vegetación [41].

5.3.4. Quantum GIS (QGIS)

Es el software empleado para construir un sistema de información geográfico (SIG), consta de un conjunto de aplicaciones con las cuales se pueden crear datos, mapas, modelos, aplicaciones y consultar datos geoespaciales. Además, es de código libre para todas las plataformas, que permite manipular formatos ráster y vectoriales así como bases de datos [42].

5.4. Parque Nacional Tortuguero

El Parque Nacional Tortuguero (PNT) se ubica al noreste del territorio costarricense y es uno de los principales sitios turísticos de Costa Rica, debido a que es reconocido internacionalmente por preservar la playa de anidación de tortugas verdes más importantes del hemisferio occidental. Además, el PNT es un paraíso para la investigación y el ecoturismo; cuenta con una extensión de 76 937 hectáreas, de las cuales 50 284 son marinas y 26 653 son terrestres [43].

El PNT es administrado por el Área de Conservación Tortuguero (ACTo) y el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) que es una dependencia del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE); el cual administra, regula e impulsa la gestión de los recursos naturales y el ambiente del país [44].

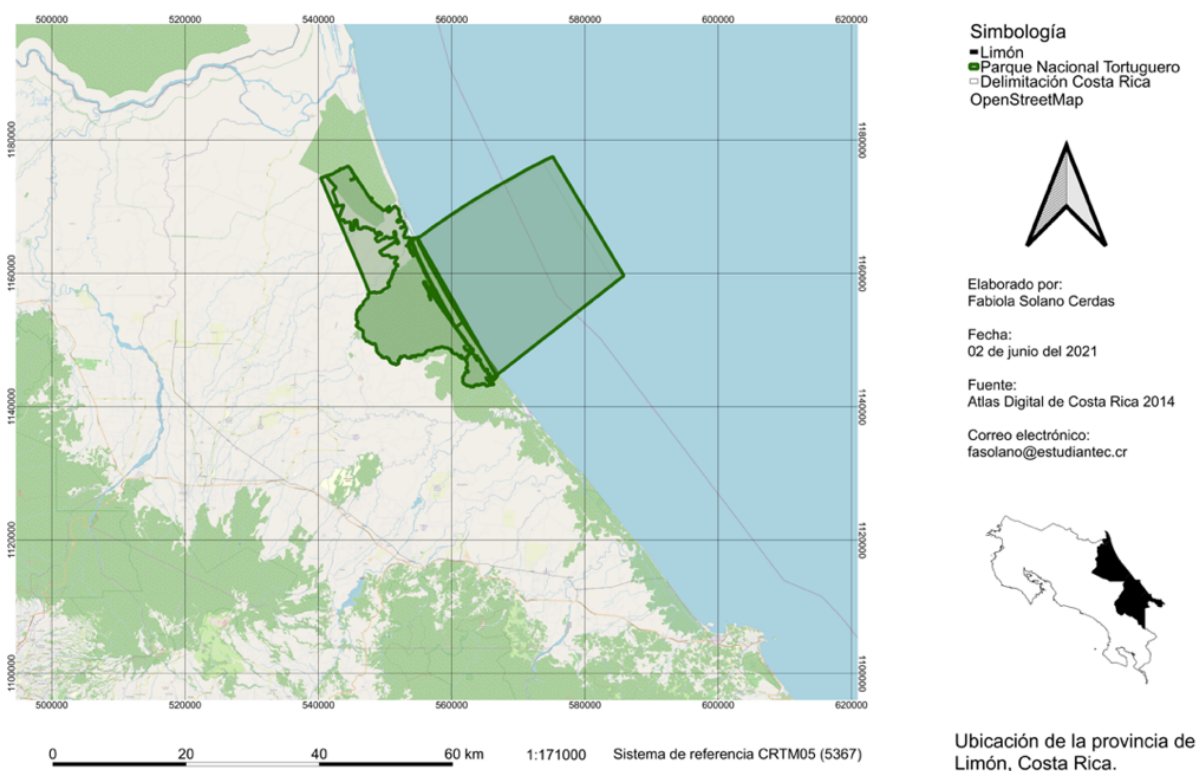


Figura 4. Ubicación del ACTo, Limón, Costa Rica. Elaboración propia.

6. La contribución de la teledetección a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los gobiernos, la industria y los científicos han demostrado la importancia que la observación de la Tierra tiene como fuente de información en soporte de muchos sectores de la sociedad. Al adoptar la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, los líderes mundiales reconocieron la importancia que la observación de la Tierra y la información geoespacial podían tener a través del suministro de evidencias, incluidas la monitorización de los indicadores con el tiempo y apoyando la implementación de soluciones para alcanzar algunas metas específicas.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en los que más se ha evidenciado la contribución de la teledetección se muestran en el cuadro 4 [45].

Cuadro 4. Contribución de la teledetección a los ODS.			
ODS	Contribución para monitorización de meta/indicador	Contribución para consecución de meta/indicador	Ejemplo de contribución
6. Agua limpia y saneamiento.	Significativa	Significativa	Control de la calidad del agua Previsión meteorológica
11. Ciudades y comunidades sostenibles.	Significativa	Significativa	Planeamiento urbano Control de infraestructuras Monitorización de calidad del aire Gestión de desastres
12. Producción y consumo responsables.	Significativa	Significativa	Gestión de recursos naturales
13. Acción por el clima.	Significativa	Significativa	Monitorización del cambio climático Gestión de desastres
14. Vida submarina.	Significativa	Significativa	Mapeo y monitorización de áreas protegidas
15. Vida de ecosistemas terrestres.	Significativa	Significativa	Monitorización de parámetros bio-geofísicos en superficie

7. Metodología

7.1. Lugar de estudio

La investigación se llevó a cabo alrededor del ACTo, en el recorrido desde el embarcadero de Tortuguero (Caño Chiquero) hasta caño California. La selección de puntos de muestreo se realizó tomando en cuenta los resultados de la modelación de concentración de nitratos presentados en un estudio anterior [46], que identifica posibles zonas de riesgo de impacto antropogénico, y tomando en cuenta el fácil acceso a la zona de muestreo.

Para la primera (época lluviosa) y segunda (época seca) gira se seleccionaron 10 puntos de muestreo en un trayecto de aproximadamente 30 km, los cuales fueron identificados y georreferenciados previamente mediante el programa QGIS y comprobados en campo con GPS.

En la Figura 5 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo seleccionados para las Giras 1 y 2, los cuales se ubican de manera ascendente desde caño California hasta el embarcadero de Tortuguero.



Figura 5. Puntos de muestreo, Tortuguero, Limón, Costa Rica. Elaboración propia.

7.2. Toma de datos

Para la selección de las fechas de los muestreos se tomó en cuenta la coincidencia con el paso del satélite Sentinel-2, así como los períodos de época seca y época lluviosa. La primera campaña de muestreo (época lluviosa) tuvo lugar el viernes 29 de julio del 2022, entre las 8:00 a.m. y 3:00 p.m., mientras que la segunda campaña (época seca) se realizó el viernes 17 de marzo del 2023, entre las 8:00 a.m. y 12:00 m.d.

Las muestras fueron tomadas desde un bote, en el centro del río, en donde se identificó como primer punto de muestreo, el más alejado cerca de Caño California, hasta llegar al último punto que es el que se encuentra en el embarcadero de Tortuguero. Las muestras de agua fueron tomadas en botellas de vidrio color ámbar de 2 L para su debido almacenamiento y posterior análisis en laboratorio. En el sitio se tomaron datos de pH, temperatura, ubicación

con el receptor de GPS, distancia con disco Secchi, nitratos, turbiedad y firmas espectrales. Posteriormente, en el laboratorio se ejecutaron análisis de clorofila-a, sólidos suspendidos totales y turbiedad, los cuales se detallan en el cuadro 5.

Cuadro 5. Metodologías empleadas en análisis de laboratorio.		
Laboratorio	Análisis	Metodología
Laboratorio de Análisis y servicios químicos (LASEQ)	Clorofila A	Método tricromático según el APHA 10200 Hc.
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC)	Sólidos Suspendidos Totales	2540-D del Manual de Procedimientos Técnicos de Química.
	Turbiedad	2130-B del Manual de Procedimientos Técnicos de Química.

En el caso de las firmas espectrales, su medición se llevó a cabo mediante el uso de un espectrorradiómetro de agua, construido en el laboratorio PRIAS (Figura 6). Este instrumento cuenta con dos sensores OceanOptics (espectrofotómetros), que miden la irradiancia descendente y ascendente de la cantidad de luz recibida por el sol, la cual permite posteriormente obtener los valores de reflectancia del objeto medido en un rango de longitud de onda entre 337 nm y 823 nm. Para obtener estos valores se midieron los valores de reflectividad del negro, el panel de referencia gris (> 50% de reflectancia difusa, superficie extremadamente lambertiana, químicamente inerte, térmicamente estable, ambientalmente estable y cuenta con calibración rastreada NIST, material Spectralon), y la reflectividad de la muestra de agua, con un nivel de repetición (30, 30, 30) respectivamente.

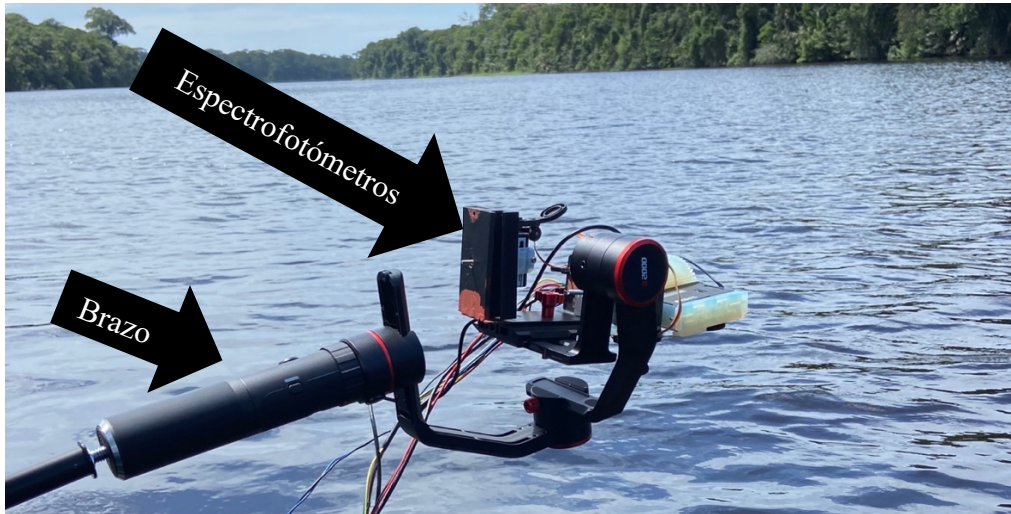


Figura 6. Equipo para la medición del espectro de reflectancia medido en el sitio .
(Construido en PRIAS, CeNAT.)

La señal de cada espectro medido fue corregida mediante el software SpecCon. En el cual el espectro de reflectancia se importa y se adapta a las longitudes de onda o al sensor de radiación. La reflectancia de la radiación se calcula para cada medición de radiación (1) y también el cambio de irradiancia (2).

$$Radiación = (Objetivo - Oscuro) * Panel reflectancia / \pi * (Referencia - Oscuro) \quad (1)$$

$$Irradiancia = (Objetivo - Oscuro) / (Referencia - Oscuro). \quad (2)$$

La reflectancia se corrige por el cambio de irradiancia (3) y finalmente se obtienen los resultados en archivos denominados como la Reflectancia de la Radiación (*.RL), Cambio de Irradiancia (*.RE) y Reflectancia (*.Rrs).

$$Reflectancia = Radiación / Irradiancia \quad (3)$$

El archivo *.Rrs se ingresa en el programa WASI, en donde es analizado en longitudes de onda que van de 450 a 900 nm.



Figura 7. Toma de firma espectral en el sitio. (Construido en PRIAS, CeNAT).

En la Figura 7 se muestra la metodología para la toma de firma espectral en el lugar. Las imágenes satelitales Sentinel-2 fueron obtenidas mediante United States Geological Survey (USGS) y por Copernicus Open Access Hub, las cuales se procesaron en el programa SNAP y luego en el programa ENVI se procesó y delimitó la zona de estudio mediante un archivo shape creado previamente en QGIS. Posteriormente, se realizó la modelación de clorofila y sólidos suspendidos mediante el programa WASI.

Dicho procedimiento se ejecutó tanto para las dos imágenes correspondientes a los días en que se realizaron las giras de campo (2022 y 2023), como para el análisis regresivo en el tiempo para los 3 años anteriores (2021, 2020 y 2019) y el año de la gira 1 (2022) pero, en época seca. En total se analizaron seis imágenes satelitales.

Además, se realizó el cálculo del Porcentaje de Error relacionando los resultados de laboratorio (valor verdadero) y los obtenidos por modelación (valor aproximado) tanto para clorofila como para sólidos suspendidos. A continuación se muestra la fórmula utilizada (4).

$$\% \text{ Error} = | (\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}) / \text{Valor verdadero} | * 100 \quad (4)$$

7.3. Presupuesto

La investigación se realizó mediante una beca otorgada por el programa de becas CeNAT-CONARE, la cual fue dirigida por el PRIAS y tenía un valor de \$3.000.000,00 los cuales fueron distribuidos tomando en cuenta lo necesario para la ejecución de ambas giras,

materiales, equipos, análisis de laboratorio y pago de horas estudiante desarrolladas en CeNAT; lo cual se detalla a continuación.

Cuadro 6. Descripción del presupuesto utilizado durante la investigación en el río Tortuguero.		
Gasto	Descripción	Monto
Diésel vehículo TEC	Se hizo uso del vehículo de la Escuela de Química para ambas giras, el traslado se realizó desde Cartago hasta la Pavona y viceversa.	¢60.000,00
Parqueo La Pavona	El servicio de Parqueo ofrecido por el embarcadero tiene un costo de ¢5.000 por noche y en ambas giras solamente se hizo uso de este servicio durante una noche	¢10.000,00
Traslado ida y vuelta La Pavona	Se debe tomar una lancha pública que realiza el traslado desde el embarcadero La Pavona hasta el Parque Nacional Tortuguero y viceversa, el cual tiene un costo de ¢3.000 por persona en cada traslado.	¢48.000,00
Hospedaje (4 personas)	El Parque Nacional permitía el hospedaje, el cual tiene un costo de ¢5.000 por persona por cada día, los cuales debían ser entregados mediante la compra de comestible, en este caso para ambas giras fueron 2 días por persona.	¢80.000,00
Alimentación (4 personas)	El desayuno fue tomado en el mismo Parque Nacional sin ningún costo adicional, sin embargo si se debía correr con los gastos de almuerzo y cena en los comercios de la zona.	¢120.000,00
Botero	Se contó con el apoyo del mismo botero para ambas giras, el cual realizaba el traslado a través de los puntos de muestreo en aproximadamente 30 km.	¢200.000,00
Análisis de Laboratorio CEQIATEC	Para la primera gira se requirió el análisis de sólidos suspendidos para todas las muestras, mientras que para la segunda gira fueron dos análisis, sólidos suspendidos y turbiedad	¢367.000,00
Análisis de Laboratorio LASEQ	Para ambas giras se realizaron los análisis de clorofila-a.	¢300.000,00
Uso de Equipo PRIAS	Contempla desde computadoras en PRIAS, como el equipo utilizado durante la gira, correspondiente al Espectrorradiómetro de Agua, GPS, computadora especializada, disco Secchi y termómetro.	¢920.000,00
Monto Total Gira 1 y 2		¢2.105.000,00
Nota: El resto del presupuesto corresponde al dinero asignado a las horas estudiante.		

8. Resultados y discusión

8.1. Gira 1 (época lluviosa, julio 2022)

8.1.1. Resultados de la modelación en época lluviosa

En las Figuras 8 y 9 se observa la modelación espectral para cada punto de muestreo y la correspondiente firma espectral tomada en el sitio.

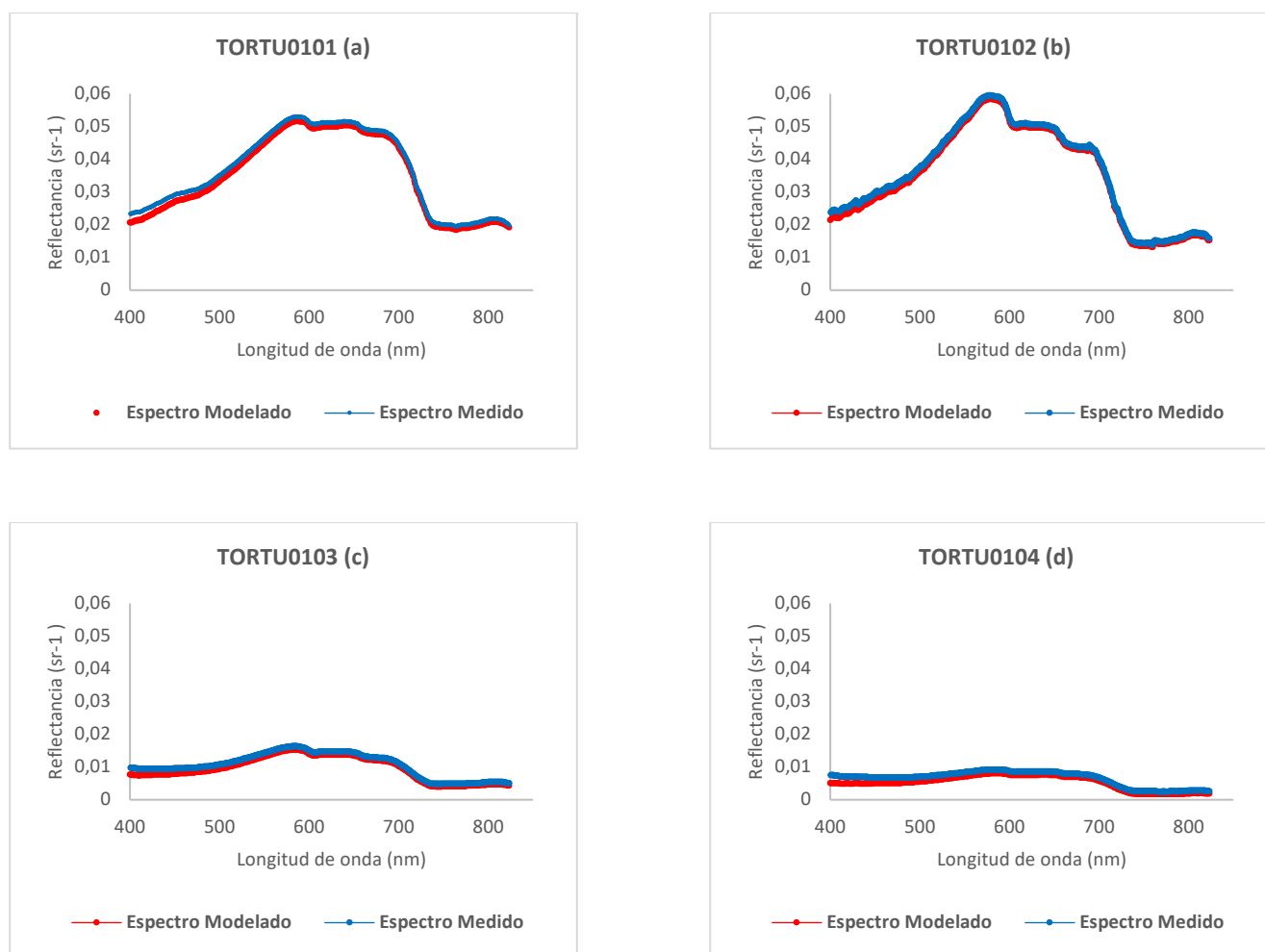


Figura 8. Espectro de reflectancia modelado y medido en los puntos seleccionados (a), (b), (c), (d) del río Tortuguero en época lluviosa. (a) y (b) muestran el espectro de reflectancia de mayor intensidad de la población de sitios examinados. El eje X corresponde a la longitud de onda en nanómetros y el eje Y corresponde a la reflectancia en unidades sr-1 de reflectancia. La línea azul es la firma espectral medida y la línea roja, la curva de mejor ajuste, es decir, el espectro modelado.

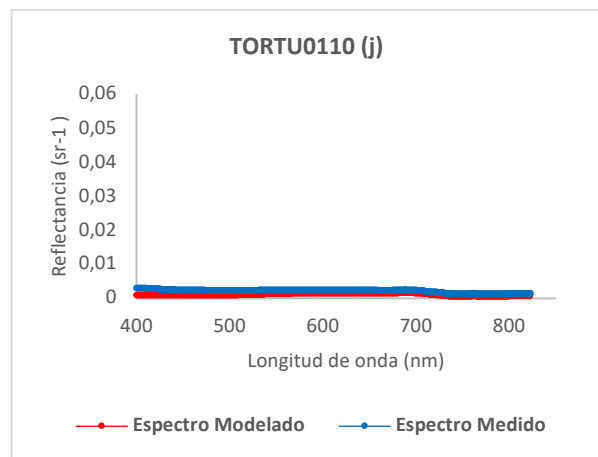
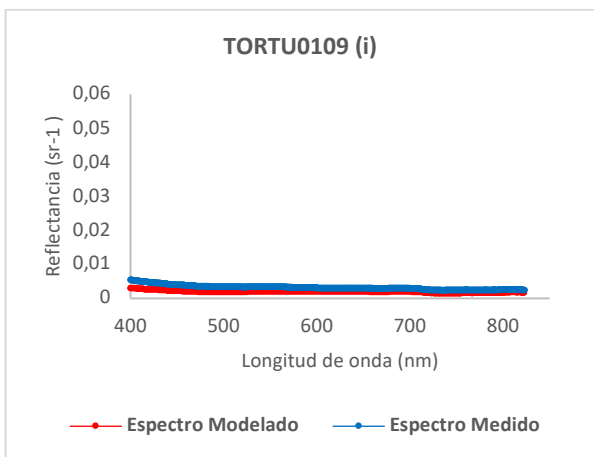
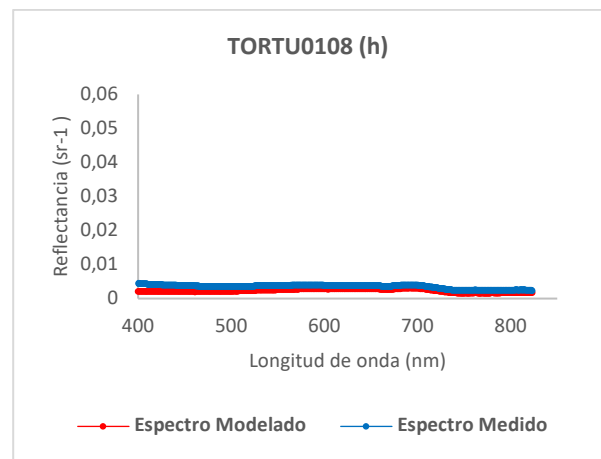
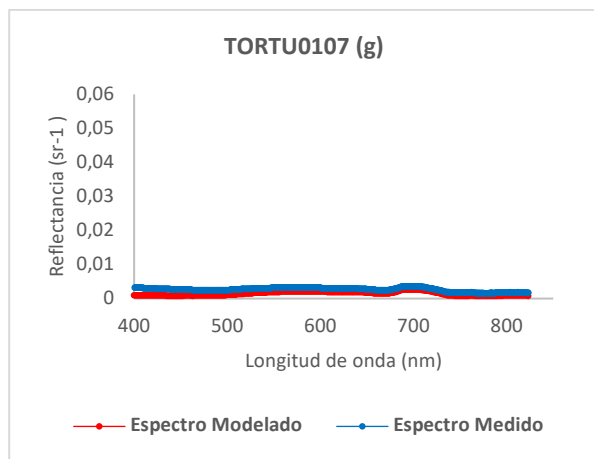
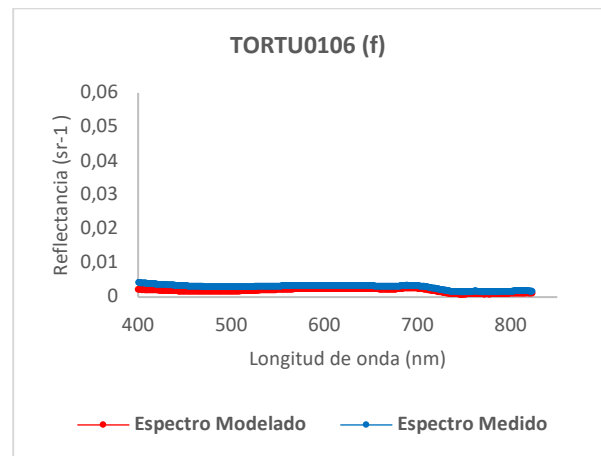
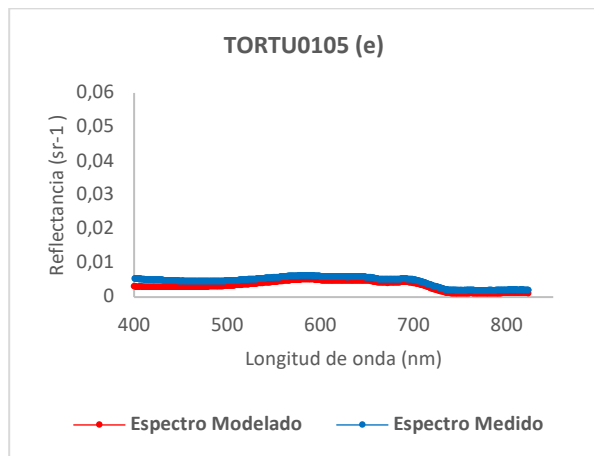


Figura 9. Espectro de reflectancia modelado y medido en los puntos seleccionados (e), (f), (g), (h), (i), (j) del río Tortuguero, época lluviosa. En todos los sitios se observa una baja intensidad asociada con baja concentración de clorofila y particulado suspendido. El eje X corresponde a la longitud de onda en nanómetros y el eje Y corresponde a la reflectancia en unidades sr-1 de reflectancia. La línea azul es la firma espectral medida y la línea roja, la curva de mejor ajuste, es decir, el espectro modelado.

Los datos espectrales correspondientes a época lluviosa presentan valores muy cercanos a cero en todo el ámbito de longitudes de onda, en el ámbito relacionado con el material particulado (500-600 nm), como con la presencia de clorofila (685-nm). Sin embargo, los datos a y b de la Figura 8, muestran un valor en la escala 5 veces más alto que el resto de puntos de muestreo, lo cual es atribuible a que son puntos de muestreo más cercanos a la confluencia de los ríos Sierpe, Jiménez y Pacuare, además, se encuentran más alejados del Parque Nacional. Esto coincide con los resultados del laboratorio.

8.1.2. Validación con los resultados de análisis en el sitio y de laboratorio

En la visita de campo en época lluviosa (julio 2022) los encargados del parque indicaron que se registraron precipitaciones en días anteriores e incluso el mismo día antes de realizar el muestreo. En los Cuadros 7 y 8 podemos observar los resultados de los análisis de turbiedad, sólidos suspendidos y clorofila realizados en el laboratorio y en el sitio.

Cuadro 7. Resultados de análisis en el laboratorio, río Tortuguero (gira del 29/07/2022).

Muestra	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Clorofila-a (mg/m³±0,01)
TORTU0101	(29 ± 4)	0,51
TORTU0102	(4,1 ± 0,6)	5,53
TORTU0103	< 3	0,59
TORTU0104	< 3	1,02
TORTU0105	< 3	5,36
TORTU0106	< 3	2,47
TORTU0107	< 3	4,17
TORTU0108	< 3	1,87
TORTU0109	< 3	2,05
TORTU0110	< 3	2,04

Cuadro 8. Resultados de análisis en el sitio, río Tortuguero (gira del 29/07/2022).

Muestra	Disco Secchi (m)		Turbiedad (UTN) (2 réplicas)	pH	Temperatura (°C)	
	Distancia visible	Profundidad			Ambiente	Agua
TORTU0101	0,50	8,00	34,80	6-7	27,3	24,67
			35,90			
TORTU0102	0,95	4,30	12,00	6-7	27,64	25,82
			12,10			
TORTU0103	1,30	2,70	6,95	6-7	28,3	25,98
			7,00			
TORTU0104	1,75	3,15	5,46	6-7	28,14	27,56
			5,36			
TORTU0105	1,65	3,60	4,29	6-7	28,98	27,56
			4,19			
TORTU0106	1,75	4,55	3,20	6-7	29,32	27,47
			3,87			
TORTU0107	1,50	4,50	3,43	6-7	29,92	29,32
			3,20			
TORTU0108	1,40	4,70	3,09	6-7	30,18	29,92
			3,91			
TORTU0109	1,60	5,40	2,13	6-7	32,44	29,75
			2,07			
TORTU0110	1,50	5,00	1,90	6-7	31,82	31,39
			1,98			

La confluencia de los ríos Sierpe, Jiménez y Pacuare, los cuales pasan cerca de zonas de cultivo, hace prever una mayor presencia de residuos agrícolas, fertilizantes, erosión, aumento de particulado, que se puede observar en los datos de análisis de turbiedad en el laboratorio de las muestras TORTU0101 y TORTU0102 (Cuadro 8). Estos altos valores igual se aprecian en el espectro modelado y medido de los sitios respectivos (Figura 8 a - b).

Los espectros modelados y medidos en las Figuras 8 (c-f) y 9 (g-j) y sus respectivos datos de laboratorio muestran escasa presencia de particulado y clorofila, lo cual indica que el parque actúa de amortiguador entre la actividad antropogénica y el río en este segmento o bien no recibe actividad antropogénica intensiva. Esto se confirma en las pruebas de laboratorio (Cuadro 7) y resultados del informe de Calidad del agua de los canales del PNT [47].

En el Cuadro 9 se muestran los resultados obtenidos mediante el modelaje de las firmas espectrales de la concentración de sólidos suspendidos y clorofila en los puntos de muestreo del río Tortuguero [39].

Cuadro 9. Resultados obtenidos por modelación de la concentración de sólidos suspendidos y clorofila y error asociado con respecto a los resultados de laboratorio (gira del 29/07/2022).

Nombre de muestra	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Clorofila-a (mg/m³)	% de Error Sólidos Suspendidos Totales	% de Error Clorofila
TORTU0101	40,77	5,14	41%	908%
TORTU0102	32,22	0,98	686%	82%
TORTU0103	12,99	5,36	333%	808%
TORTU0104	9,38	3,45	213%	238%
TORTU0105	7,12	10,25	137%	91%
TORTU0106	3,78	6,56	26%	166%
TORTU0107	3,77	42,25	26%	913%
TORTU0108	3,79	7,32	26%	291%
TORTU0109	0,10	0,00	97%	100%
TORTU0110	2,78	1,47	7%	28%

El comportamiento mostrado de los resultados del modelaje coincide en tendencia con los datos de laboratorio, sin embargo, muestran un alto porcentaje de error en la cuantificación en la mayoría de los casos. Es decir, la metodología de teledetección es sensible a ambos parámetros, pero su límite de cuantificación en época lluviosa no es adecuado.

El error en cuantificación podría ocasionar una discrepancia importante en la evaluación del cuerpo de agua, por ejemplo, los datos de clorofila obtenidos en el laboratorio ubican al sistema en clasificación oligotrófica, es decir, baja productividad, según el Programa Internacional para la Organización, Cooperación y Desarrollo Económico de aguas interiores (OECD) [48], y los resultados de clorofila de cada punto modelado mostrados en el Cuadro 9, indican la misma clasificación que los datos de laboratorio, a excepción del punto TORTU0105 y TORTU0107, que exceden los valores moderados de eutrofización determinados por el OECD. El alto porcentaje de error en la cuantificación puede deberse a que los algoritmos de bandas azul y verde de clorofila están diseñados para sistemas en los que la clorofila se presenta en grandes concentraciones, por lo que es el absorbente dominante y no en cantidades tan bajas [51].

En el caso de los suspendidos se tiene que la mayoría de los puntos de análisis en laboratorio dan valores que se encuentran dentro del intervalo identificado como clase 1 (sin contaminación), según el Índice Holandés, exceptuando el punto TORTU0101 que corresponde a clase 2 (contaminación incipiente), sin embargo, mediante la modelación de firmas espectrales, aunque se obtuvo una tendencia similar, se obtienen resultados disímiles, en donde las muestras TORTU0104-TORTU0110 se clasifican según los resultados de sólidos suspendidos, como clase 1, pero las muestras TORTU0102 y TORTU0103 como clase 2 y la muestra TORTU0101 como clase 3 (contaminación moderada).

Las bajas concentraciones no permiten determinar con exactitud los valores reales con el modelaje, sin embargo, se observa un comportamiento a lo largo del río bastante uniforme y similar a los datos de laboratorio en el caso del particulado, exceptuando los puntos TORTU0102, TORTU0103 y TORTU0104, donde se obtuvo una sobreestimación respectivamente de 686%, 333% y 213%.

Los valores modelados muestran una mayor concentración tanto de clorofila como de particulado, con respecto a los valores de referencia (análisis de laboratorio). Esto indica que la precisión con que se puede lograr resultados en un ambiente acuático diluido es limitada.

En estudios anteriores, en los meses de agosto y noviembre del 2012, se encontraron concentraciones de clorofila menores a 2 mg/m^3 [50], los cuales corresponden a la caracterización de valores oligotróficos determinados por el OECD [48]. Lo cual coincide con los datos de laboratorio y la mayoría de los resultados obtenidos en esta gira.

En la Figura 10 se observan los perfiles de concentraciones a lo largo del río de los sólidos suspendidos y clorofila modelados a partir de datos espectrales Sentinel-2, del día 29 de julio del 2022. La figura presenta para ambos casos, ausencia o muy baja presencia (color azul) de material particulado y clorofila a lo largo del cauce de los canales del río Tortuguero [18]. Además, se pueden observar cortes debido a la alta nubosidad en la parte baja, las cuales constituyen un obstáculo importante debido a que las nubes absorben todo el espectro, impidiendo la transmisión entre superficie y sensor y éstas son frecuentes en las zonas tropicales [17].

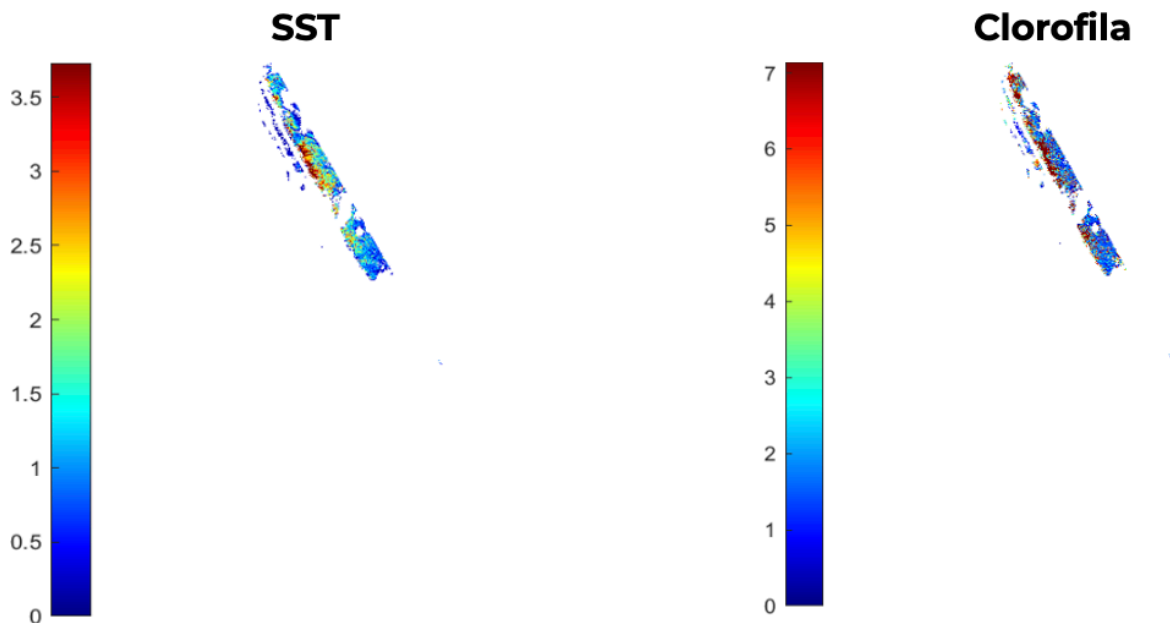


Figura 10. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con los datos de la gira en época lluviosa, para sólidos suspendidos (izquierda) y clorofila (derecha). Elaborado con el programa WASI.

8.2. Gira 2, (marzo 2023, época seca)

8.2.1. Resultados de la modelación en época seca

En las Figuras 11 y 12 se observa la modelación espectral para cada punto de muestreo y su correspondiente firma espectral tomada en el sitio.

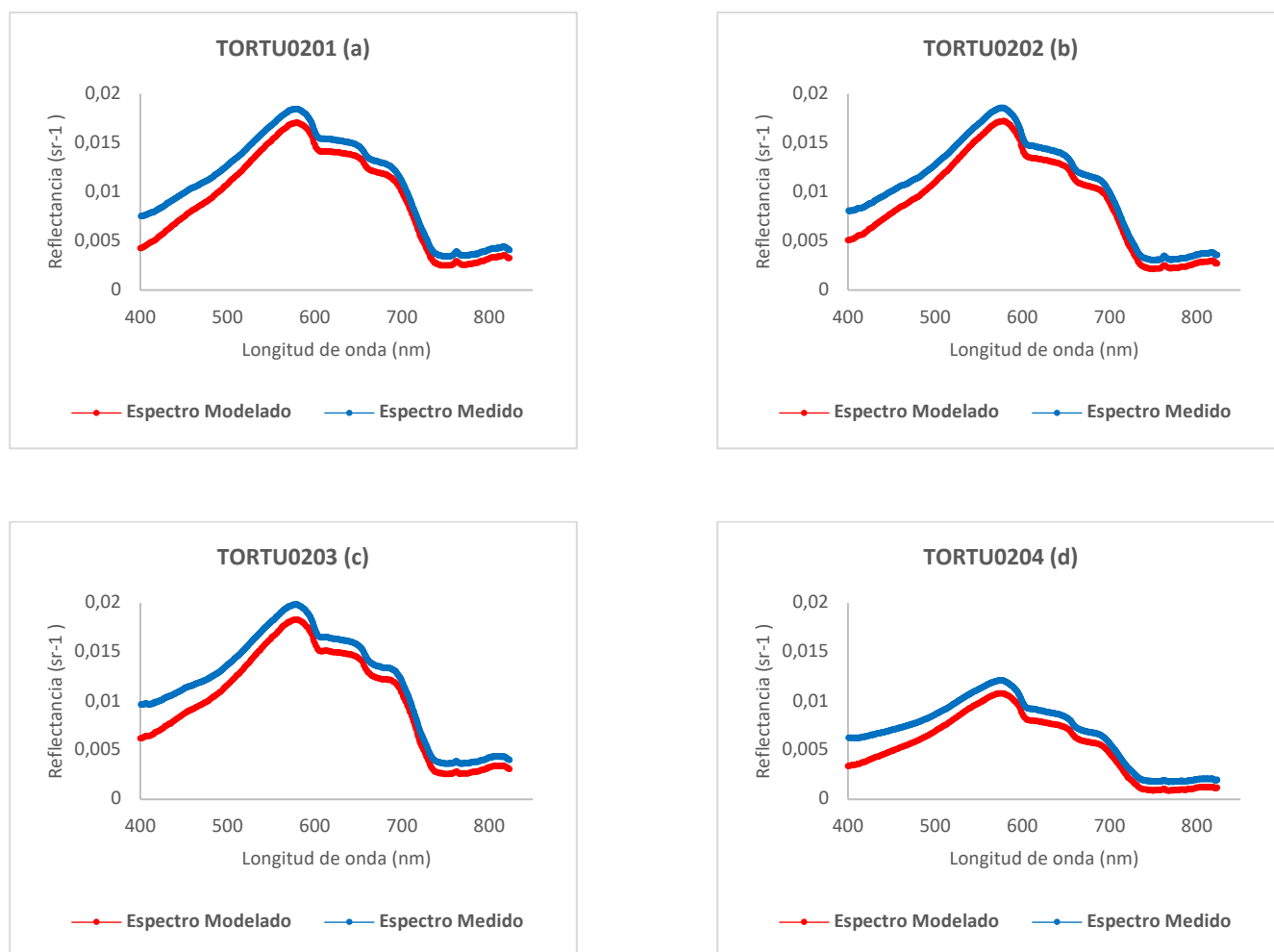


Figura 11. Espectro de reflectancia modelado y medido en los puntos seleccionados (a), (b), (c), (d) del río Tortuguero, época seca. (a), (b) y (c) corresponden a los sitios de muestreo con el espectro de reflectancia de mayor intensidad de la población de puntos examinados. El eje X corresponde a la longitud de onda en nanómetros (nm) y el eje Y corresponde a la reflectancia en unidades sr⁻¹. La línea azul es la firma espectral medida y la línea roja, el espectro modelado.

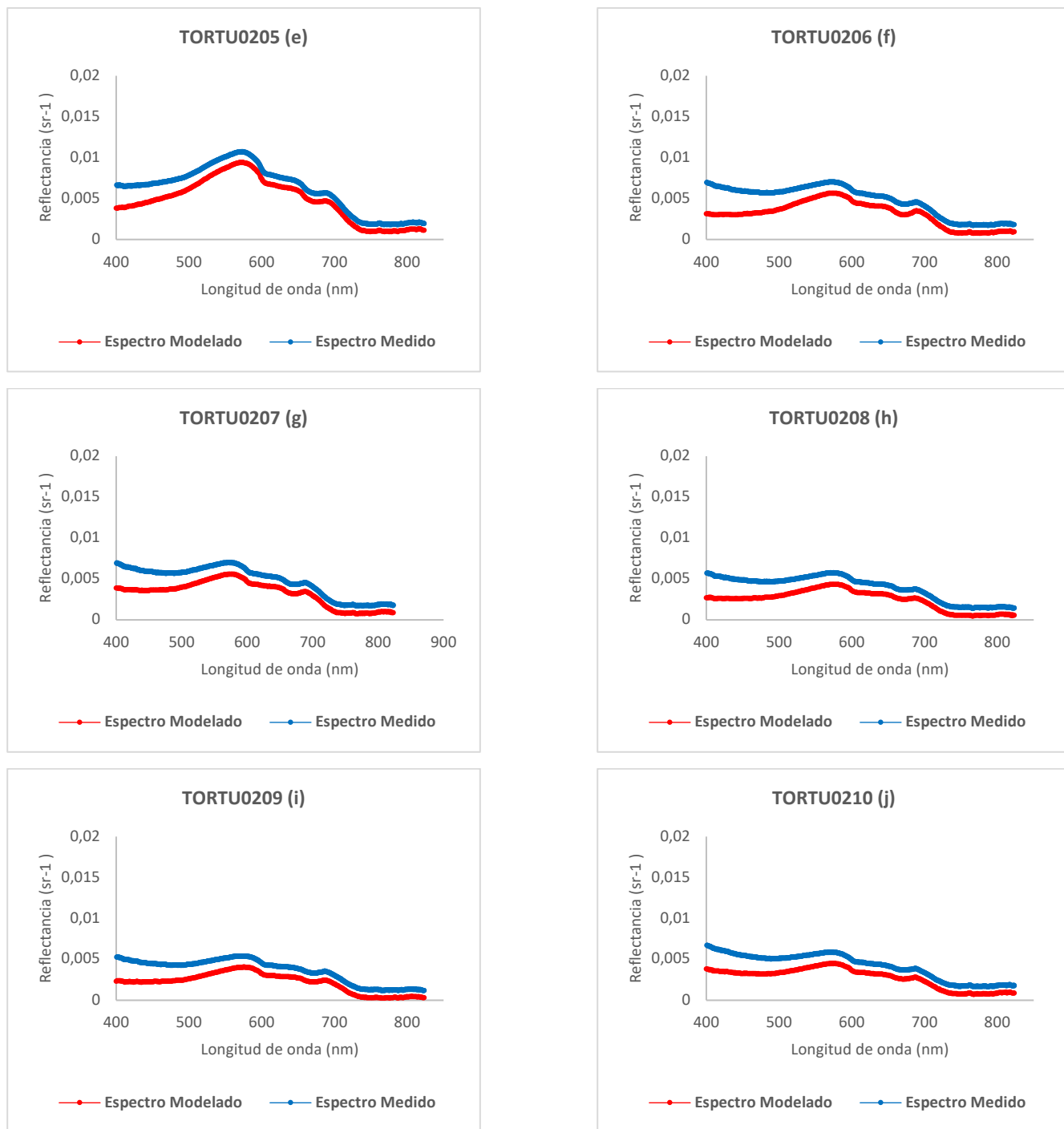


Figura 12. Espectro de reflectancia modelado y medido en los puntos seleccionados (e), (f), (g), (h), (i), (j) del río Tortuguero, época seca. En los puntos (e), (f), (g), (h), (i), (j) se observa una baja intensidad asociada con baja concentración de clorofila y particulado suspendido. El eje X corresponde a la longitud de onda en nanómetros (nm) y el eje Y corresponde a la reflectancia en unidades sr^{-1} . La línea azul es la firma espectral medida y la línea roja, el espectro modelado.

En casi todos los resultados de la modelación correspondientes a época seca se observan valores muy cercanos a cero en todo el ámbito de longitudes de onda, y tanto en el ámbito relacionado con el material particulado (500-600 nm) como con la presencia de clorofila (685 nm). Sin embargo, los sitios correspondientes con los puntos más alejados del Parque Nacional y cercanos a la confluencia de los ríos Sierpe, Jiménez y Pacuare (a, b y c de la Figura 11), muestran un valor en la escala 5 veces más alto que el resto de las figuras. Esto coincide con los datos del análisis en laboratorio y está relacionado con el arrastre de contenidos derivados de la actividad antropogénica en los ríos que confluyen. Además, los valores de época seca muestran ser hasta 10 veces más bajos que en época lluviosa, lo cual podría relacionarse con que en época lluviosa hay mayor turbulencia, provocando levantamiento de más particulado, mientras que, en época seca el suelo no se remueve.

8.2.2. Validación con los resultados obtenidos en el sitio y en el laboratorio

En la visita de campo al río Tortuguero en época seca (marzo 2023) los encargados del parque indicaron que no se registraron precipitaciones en semanas anteriores. En los Cuadros 10 y 11 se encuentran los resultados de los análisis de turbiedad, sólidos suspendidos y clorofila.

Cuadro 10. Resultados de análisis realizados en el sitio, río Tortuguero (17/03/2023).

Nombre de muestra	Disco Secchi (m)		pH	Temperatura (°C)		Observaciones
	Distancia visible	Profundidad		Ambiente	Agua	
TORTU0201	1,10	4,10	6-7	30,18	26,56	Más vegetación acuática, menor caudal.
TORTU0202	0,82	3,14	6-7	29,75	26,48	Reacción lenta nitratos. Poca vegetación acuática.
TORTU0203	0,80	3,10	6-7	29,58	26,6	No vemos vegetación acuática. Conservación del manglar.
TORTU0204	1,60	4,35	6-7	29,41	28,31	Hay más vegetación.
TORTU0205	1,60	4,35	6-7	29,7	28,39	Cauce río ancho, abundante vegetación acuática.
TORTU0206	1,30	4,40	6-7	30,52	29,24	Cauce río ancho, abundante vegetación acuática.
TORTU0207	1,50	4,50	6-7	30,35	29,75	Cauce río ancho, abundante vegetación acuática.
TORTU0208	1,60	4,80	6-7	31,74	30,52	Cauce río ancho, menos vegetación acuática.
TORTU0209	1,60	5,40	6-7	31,5	30,26	Bosque más denso.
TORTU0210	1,70	7,20	6-7	31,39	30,95	Vegetación diferente, más presencia de dinámica de claros.

Cuadro 11. Resultados obtenidos en los análisis de laboratorio de las muestras. río Tortuguero (17/03/2023).			
Muestra	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Turbiedad (UTN)	Clorofila-a (mg/m³ ± 0,02)
TORTU0201	19 ± 2	4 ± 1	2,21
TORTU0202	10 ± 2	13 ± 3	1,89
TORTU0203	10 ± 2	1,1 ± 0,3	5,6
TORTU0204	< 3	1,2 ± 0,3	2,72
TORTU0205	< 3	5 ± 1	7,21
TORTU0206	4,0 ± 0,6	3,3 ± 0,9	9,51
TORTU0207	3,5 ± 0,5	2,6 ± 0,7	10,02
TORTU0208	4,3 ± 0,7	1,4 ± 0,4	4,42
TORTU0209	< 3	1,8 ± 0,5	4,42
TORTU0210	< 3	2,4 ± 0,6	3,82

Los resultados modelados de concentración de sólidos suspendidos y clorofila en agua mediante las firmas espectrales tomadas en cada punto de muestreo se observan en el Cuadro 12 [39]. En los 10 puntos de muestreo se obtuvieron valores de turbiedad por debajo de los 25 UTN, siendo los 2 primeros los que presentan mayor concentración.

Nuevamente, la confluencia de los ríos Sierpe, Jiménez y Pacuare que pasan cerca de zonas de cultivo, hace prever una mayor presencia de residuos agrícolas, fertilizantes, erosión, aumento de particulado, que se puede observar en los datos de análisis de las muestras TORTU0201, TORTU0202 y TORTU020 y en las firmas espectrales modeladas que muestran valores ligeramente altos en las Figura 11 a-c. Por el contrario, lo observado en la Figura 11 (d) y Figura 12 (e-j) y sus respectivos datos de laboratorio indican escasa presencia de particulado y clorofila. Esto es atribuible a que el parque actúa de amortiguador entre la actividad antropogénica y el río en este segmento o bien no hay cuerpos de arrastre. Los bajos valores se validaron como coincidentes con el informe de Calidad del agua de los canales del PNT [17].

Cuadro 12. Resultados obtenidos por modelación de la concentración de sólidos suspendidos y clorofila, y error asociado con respecto a los resultados de laboratorio (gira 17/03/23).

Nombre de muestra	Sólidos Suspendidos Totales-C_X (mg/L)	Clorofila C[0] (mg/m³)	% de Error Sólidos Suspendidos Totales	% de Error Clorofila
TORTU0201	10,14	9,41	47%	326%
TORTU0202	9,07	10,00	9%	429%
TORTU0203	9,34	9,99	7%	78%
TORTU0204	4,81	9,72	38%	257%
TORTU0205	4,10	14,95	37%	107%
TORTU0206	3,36	23,10	16%	143%
TORTU0207	3,06	19,26	13%	92%
TORTU0208	2,54	22,12	41%	400%
TORTU0209	2,21	21,47	26%	386%
TORTU0210	2,21	16,45	26%	331%

La tendencia en los resultados de análisis de laboratorio y los resultados de la modelación con las firmas espectrales coincide, sin embargo, los resultados modelados muestran un alto porcentaje de error en la cuantificación en la mayoría de los casos. Es decir, la metodología de teledetección es sensible a ambos parámetros, pero su exactitud es baja. Los resultados en este caso, nos podrían llevar al siguiente error en la evaluación del cuerpo de agua. Los datos de laboratorio obtenidos de clorofila van desde los 2,21 a 10,02 µg/L, lo cual de acuerdo al OECD [48] y según su contenido de clorofila, se trata de una clasificación oligotrófica, es decir, los contenidos de clorofila del río están dentro del ámbito de baja productividad [49], a excepción de los puntos TORTU0206 y TORTU0207 que corresponden a un sistema de productividad moderada, es decir, mesotrófico. Sin embargo, los resultados de clorofila de cada punto de muestreo a través del procesamiento de firmas espectrales y modelado indican resultados que corresponden a un sistema mesotrófico para todos los puntos muestreados.

Por otra parte, los datos obtenidos de sólidos suspendidos en los análisis de laboratorio corresponden con el intervalo asignado para los contenidos de sólidos suspendidos en clase 1, según el Índice Holandés, exceptuando los puntos TORTU0201, TORTU0202 y TORTU0203 que corresponden a clase 2 (contaminación incipiente) y en la modelación se obtuvo un comportamiento en donde el punto TORTU0201 se clasifica con un contenido de particulado clase 2 y el resto de los puntos como clase 1.

En estudios anteriores, en los meses de agosto y noviembre del 2012, se encontraron concentraciones de clorofila menores a 2 mg/m^3 [50], es decir clase 1, lo cual valida los resultados obtenidos en esta gira para la mayoría de los puntos muestreados bajo ambas metodologías.

En la Figura 13 se observan los perfiles de concentración modelados correspondientes a sólidos suspendidos y clorofila en el río Tortuguero, construidos con los datos espectrales Sentinel-2, del día 16 de marzo del 2023 y ajuste de parámetros con señal espectral que se obtiene por procesamiento con WASI. En la figura se muestran, para ambos casos, bajas concentraciones (color azul) a lo largo del cauce de los canales del río Tortuguero [18]. Lo anterior coincide con los análisis de laboratorio. Además, se pueden observar cortes debido a la alta nubosidad en la parte baja, las cuales constituyen un obstáculo importante debido a que absorben todo el espectro, impidiendo la transmisión entre superficie y sensor [17].

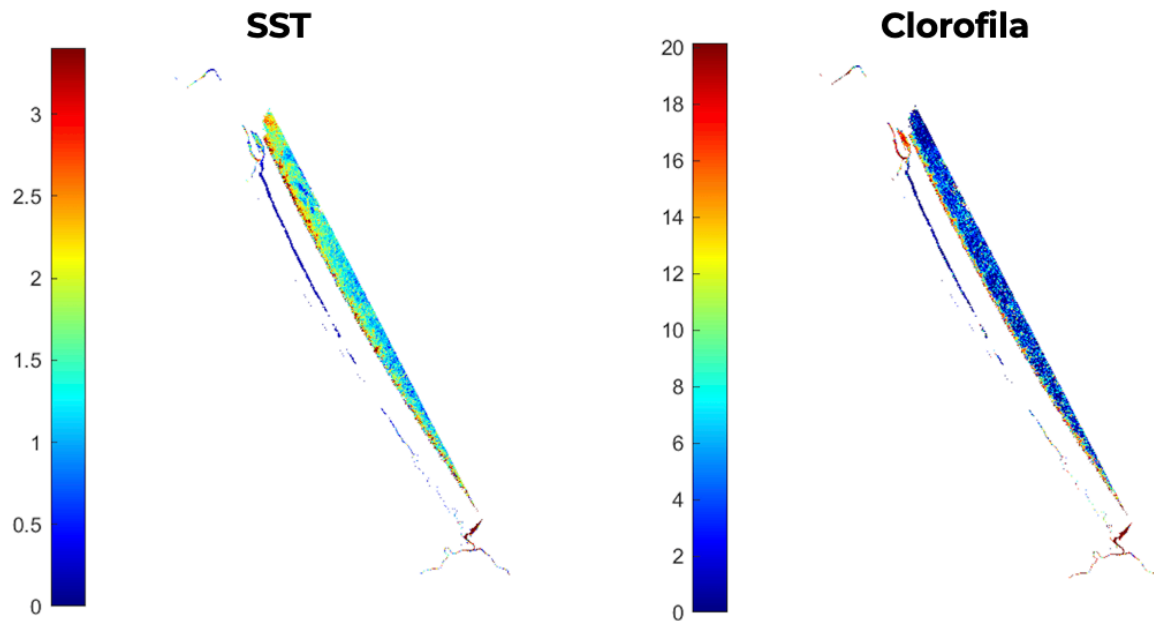


Figura 13. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos en época seca, para sólidos suspendidos (izquierda) y clorofila (derecha). Elaborado con el programa WASI.

8.3. Comparación de los resultados obtenidos en época lluviosa y época seca

Los resultados obtenidos mediante modelación de clorofila y sólidos suspendidos en ambas giras coinciden con los bajos valores generales reportados en el Informe de Calidad del agua de los canales del PNT [47].

A continuación en el Cuadro 13 se muestra la comparación de datos obtenidos de profundidad del agua en metros a lo largo del río Tortuguero en época lluviosa y época seca.

Cuadro 13. Comparación de datos de profundidad tomados en el sitio en época lluviosa y seca, en el río Tortuguero.			
Época Lluviosa		Época Seca	
Punto de Muestreo	Profundidad (m)	Punto de Muestreo	Profundidad (m)
TORTU0101	8,0	TORTU0201	4,1
TORTU0102	4,3	TORTU0202	3,1
TORTU0103	2,7	TORTU0203	3,1
TORTU0104	3,2	TORTU0204	4,4
TORTU0105	3,6	TORTU0205	4,4
TORTU0106	4,6	TORTU0206	4,4
TORTU0107	4,5	TORTU0207	4,5
TORTU0108	4,7	TORTU0208	4,8
TORTU0109	5,4	TORTU0209	5,4
TORTU0110	5,0	TORTU0210	7,2

En el Cuadro 13 se puede observar claramente que los puntos 1 y 2 donde confluyen otros ríos, presentan una profundidad mucho mayor en la época lluviosa que en la época seca.

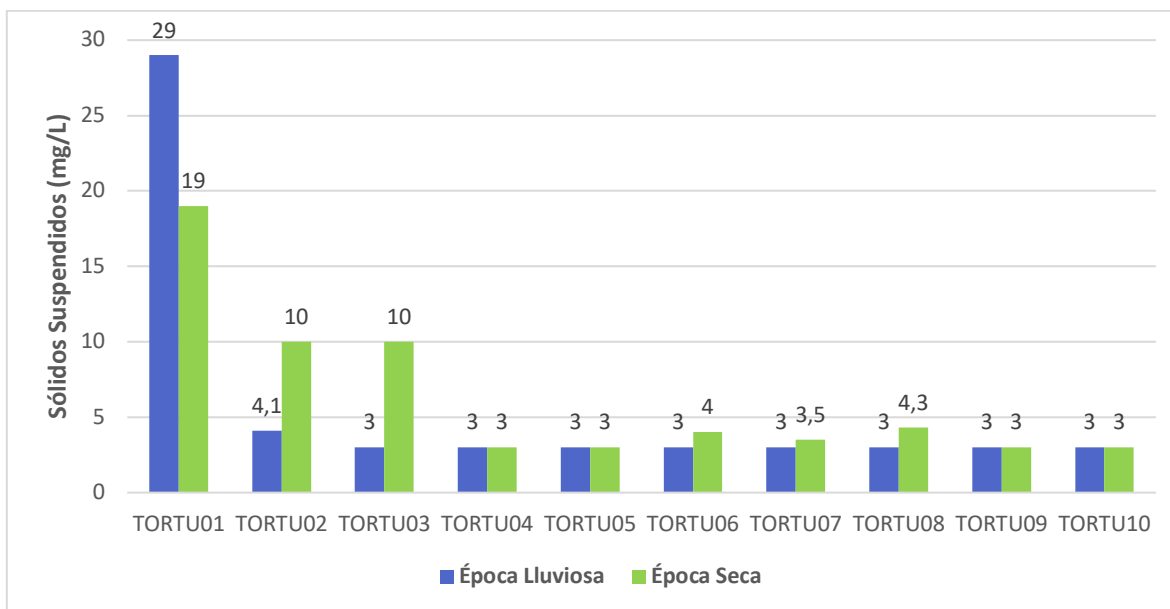


Figura 14. Concentración de Sólidos Suspendedos obtenida mediante análisis de laboratorio en época lluviosa y época seca.

En la Figura 14, se muestra el comportamiento de sólidos suspendidos en ambas épocas, para el caso del análisis de laboratorio. Se puede observar el incremento respectivo de la concentración en época seca, exceptuando el punto 1, en el cual se obtuvo una mayor concentración en época lluviosa por arrastre del caudal de los ríos de confluencia.

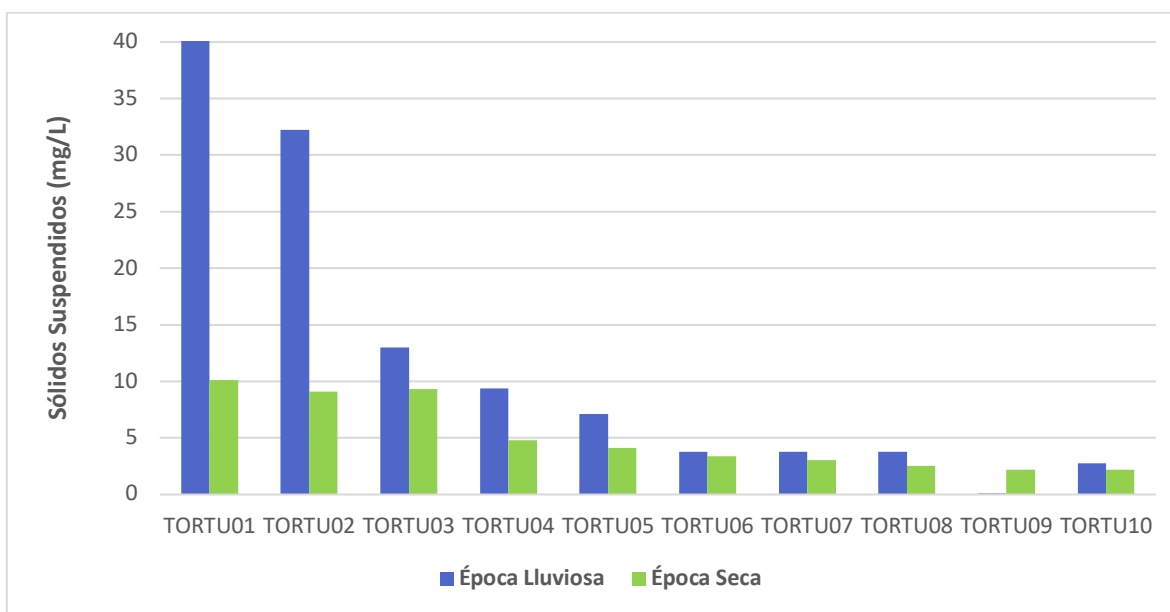


Figura 15. Concentración de Sólidos Suspendidos obtenida mediante modelación espectral utilizando el programa WASI en época lluviosa y época seca.

En el caso de los resultados obtenidos mediante modelación espectral utilizando el programa WASI, los cuales se muestran en la Figura 15, los resultados indican una mayor concentración de sólidos suspendidos en época lluviosa, pero un comportamiento decreciente conforme los puntos de muestreo se alejan de la zona de confluencia, lo cual coincide con los resultados de laboratorio mostrados en la Figura 14. Esto pareciera indicar que la sobreestimación de la concentración es mayor cuando hay más caudal (y el efecto de fondo por reflexión del agua podría ser mayor).

Por otro lado, en la Figura 16 se muestran los resultados correspondientes al análisis de clorofila-a en laboratorio para ambas épocas, en donde se puede observar un aumento de la concentración de clorofila en época seca, exceptuando el punto de muestreo 2. También, se logra ver un incremento de clorofila en los puntos intermedios, los cuales se encuentran en una zona en la que se podía observar un incremento en la vegetación acuática en el sitio.

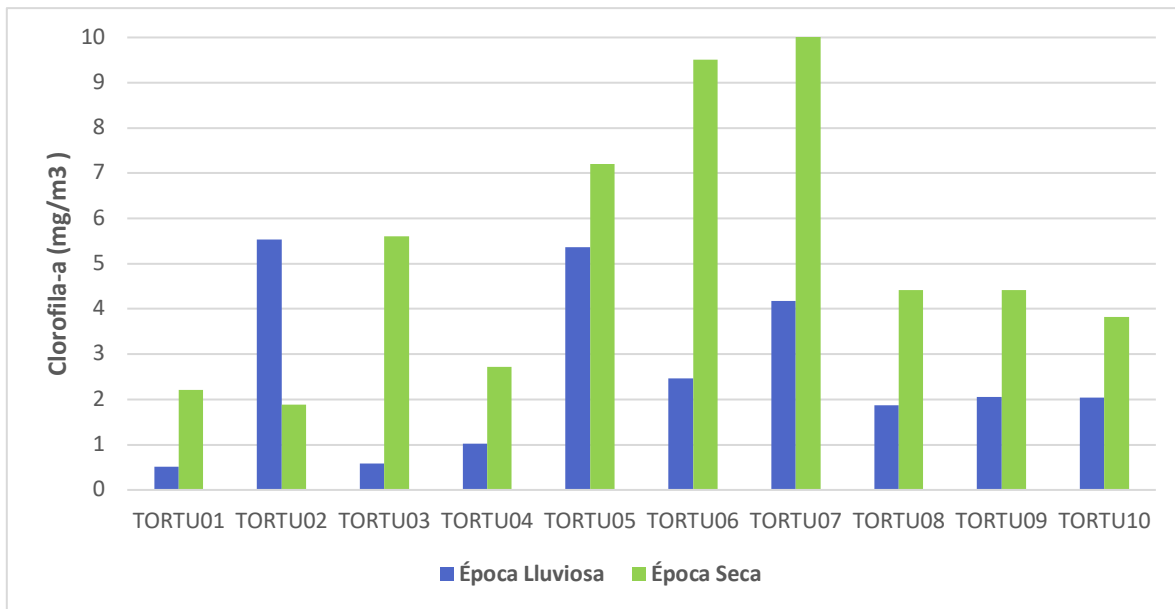


Figura 16. Concentración de Clorofila-a obtenida mediante el análisis de laboratorio en época lluviosa y época seca.

En los resultados obtenidos por modelación (Figura 17) se observa un comportamiento similar al que se puede observar en los obtenidos por análisis de laboratorio (Figura 16). Ya que, en época seca se muestra una mayor concentración de clorofila en comparación a las concentraciones obtenidas en época lluviosa, a excepción del punto 7. Con la clorofila-a se evidencia el incremento de vegetación acuática en época seca, tanto en los resultados de laboratorio como en los resultados de la modelación.

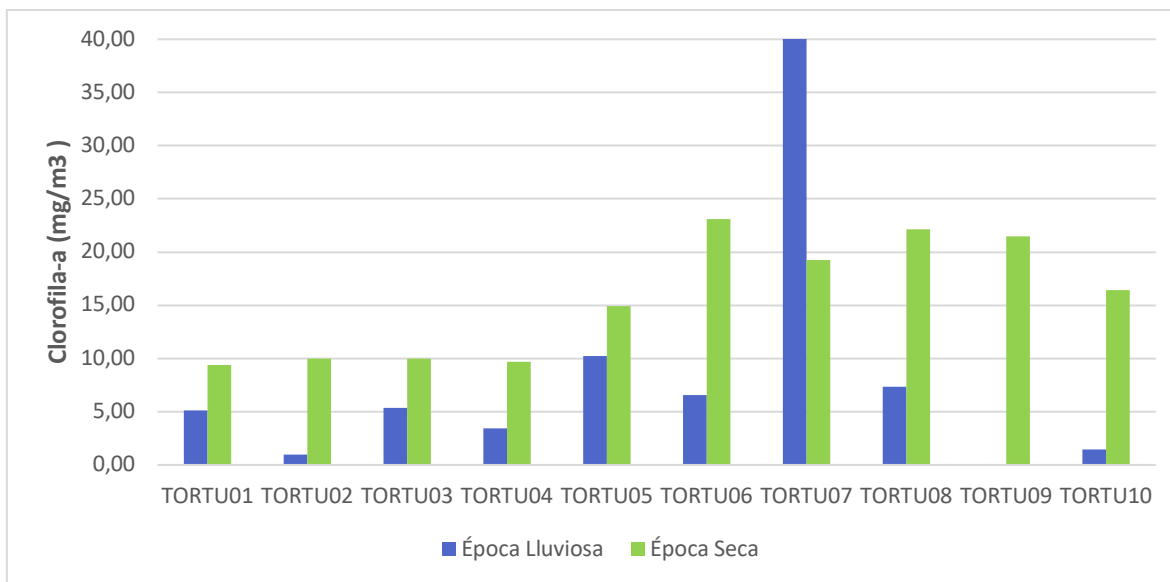


Figura 17. Concentración de Clorofila-a obtenida mediante modelación espectral utilizando el programa WASI en época lluviosa y época seca.

Con los muestreos de época seca y lluviosa se obtiene que la metodología estudiada presenta sensibilidad para la modelación de los parámetros, pero baja exactitud con respecto a los datos de laboratorio. En las concentraciones de clorofila-a presentes en el cuerpo de agua estudiado podría ser atribuible a la influencia del fondo del agua o presencia de comunidades de algas [52].

En la Figura 18 se muestra el comportamiento del dato de turbiedad en ambas giras, que casi en su totalidad se ha mantenido dentro del rango correspondiente a clase 1, según el Índice Holandés. La única excepción se encuentra en el punto TORTU0101, correspondiente al primer punto de muestreo en época lluviosa, el punto más cercano al punto de confluencia. Es de esperar que en época de lluvias la turbiedad aumente por el movimiento y crecimiento del caudal del río.

Según el Informe de Calidad del agua de los canales del PNT [47], las aguas de los canales de Tortuguero no presentan contaminación desde el análisis de particulado. Los puntos de muestreo analizados y discutidos en estas giras, incluyen algunos puntos comunes con la presente investigación, que son los ubicados cerca de Río Tortuguero, Caño California, Caño Servulo, Caño Negro y Laguna Jalova. En el informe mencionado, se presenta un

comportamiento de mayor particulado en Caño California, lo cual coincide con lo obtenido en los primeros 2 puntos de muestreo en ambas giras.

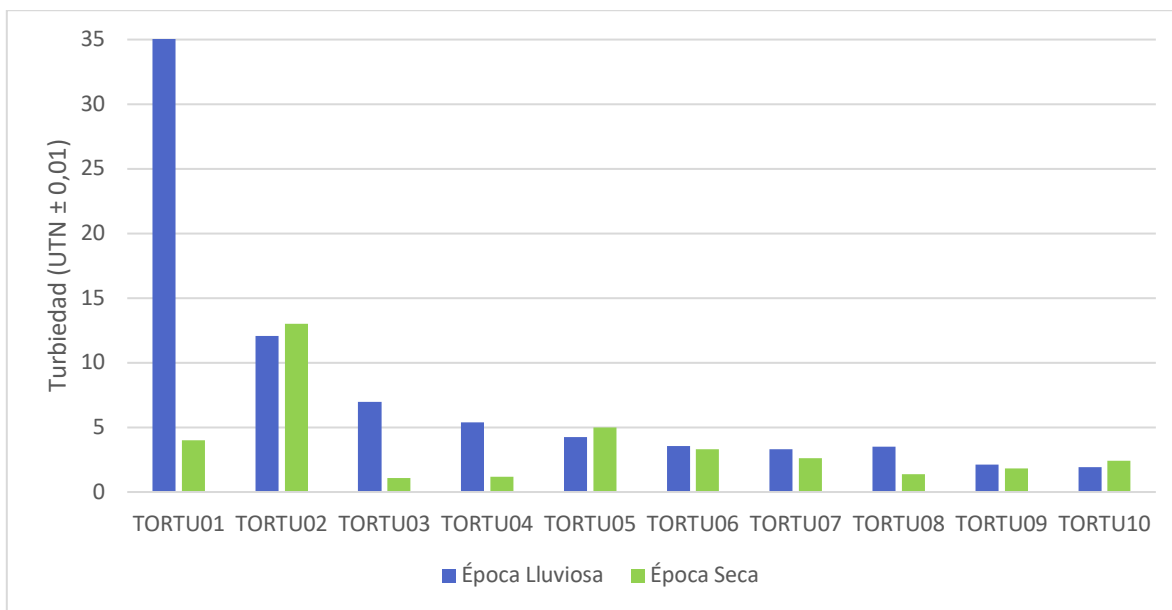


Figura 18. Turbiedad obtenida mediante análisis de laboratorio en época lluviosa y época seca.

8.4. Análisis Retrospectivo

Se realizaron los perfiles de concentraciones modeladas en el río Tortuguero para clorofila y sólidos suspendidos de manera retrospectiva, tomando en cuenta desde el año 2019 al 2023, los cuales se presentan a continuación en las figuras 19-22. En las que se puede observar que se ha mantenido el comportamiento de poca presencia de particulado y clorofila, observado en la predominancia del color azul de todo el cauce.

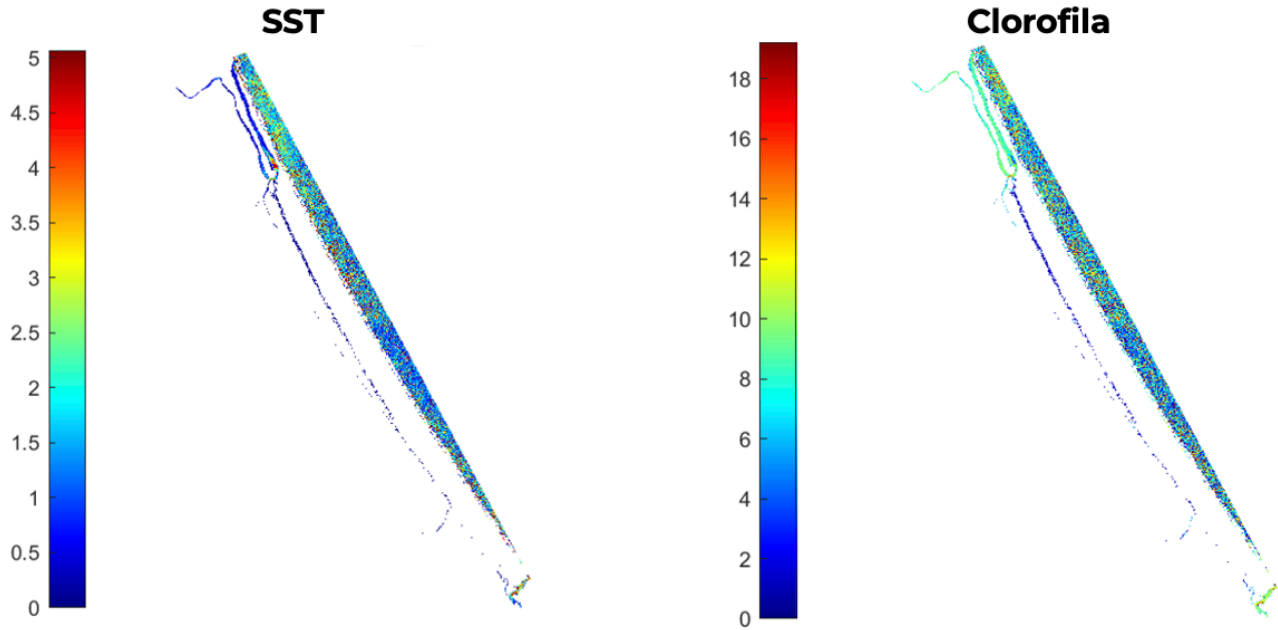


Figura 19. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos de julio 2019, para clorofila (izquierda) y sólidos suspendidos (derecha). Elaborado con el programa WASI.

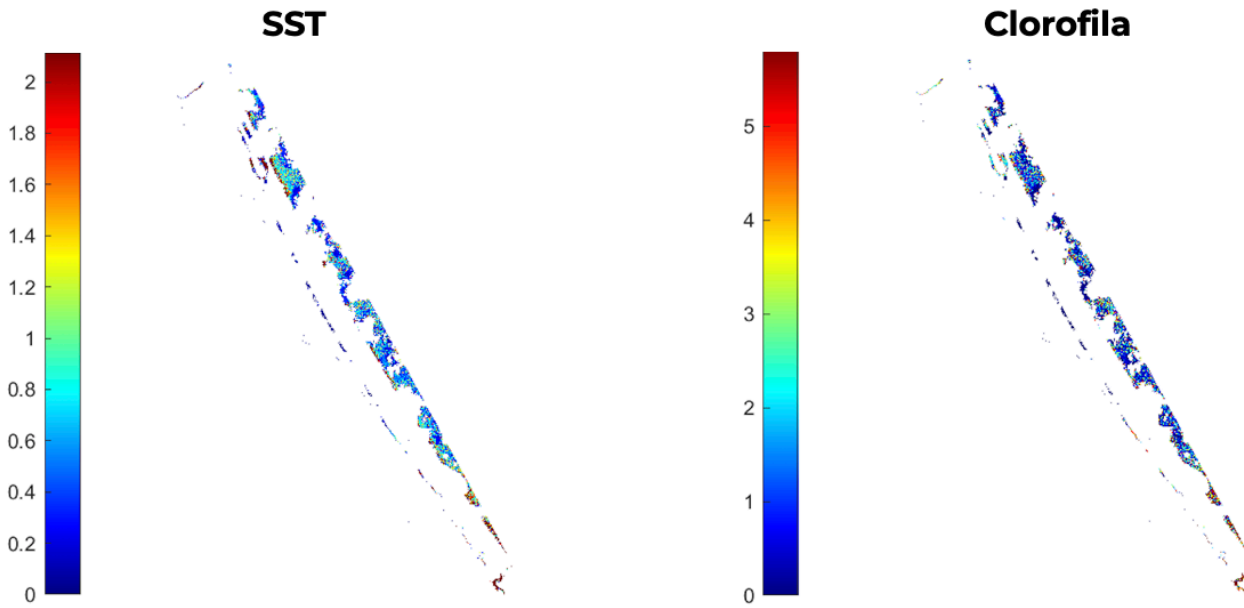


Figura 20. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos de agosto 2020, para clorofila (izquierda) y sólidos suspendidos (derecha). Elaborado con el programa WASI.

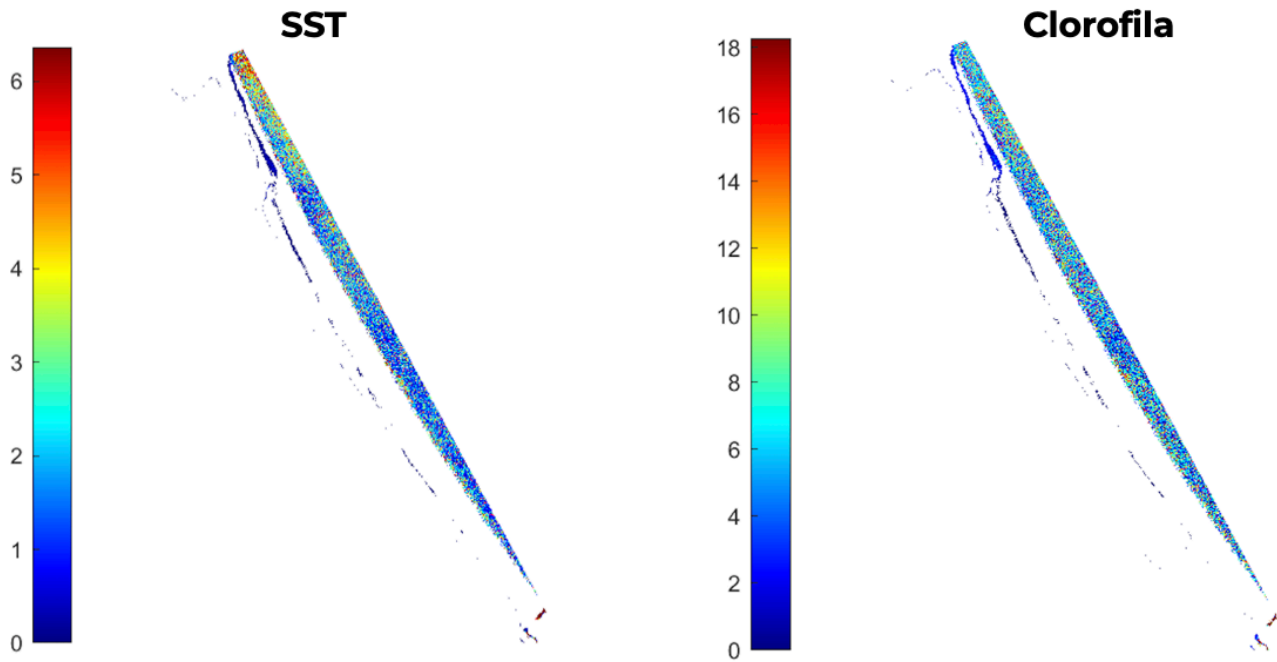


Figura 21. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos de julio 2021, para clorofila (izquierda) y sólidos suspendidos (derecha). Elaborado con el programa WASI.

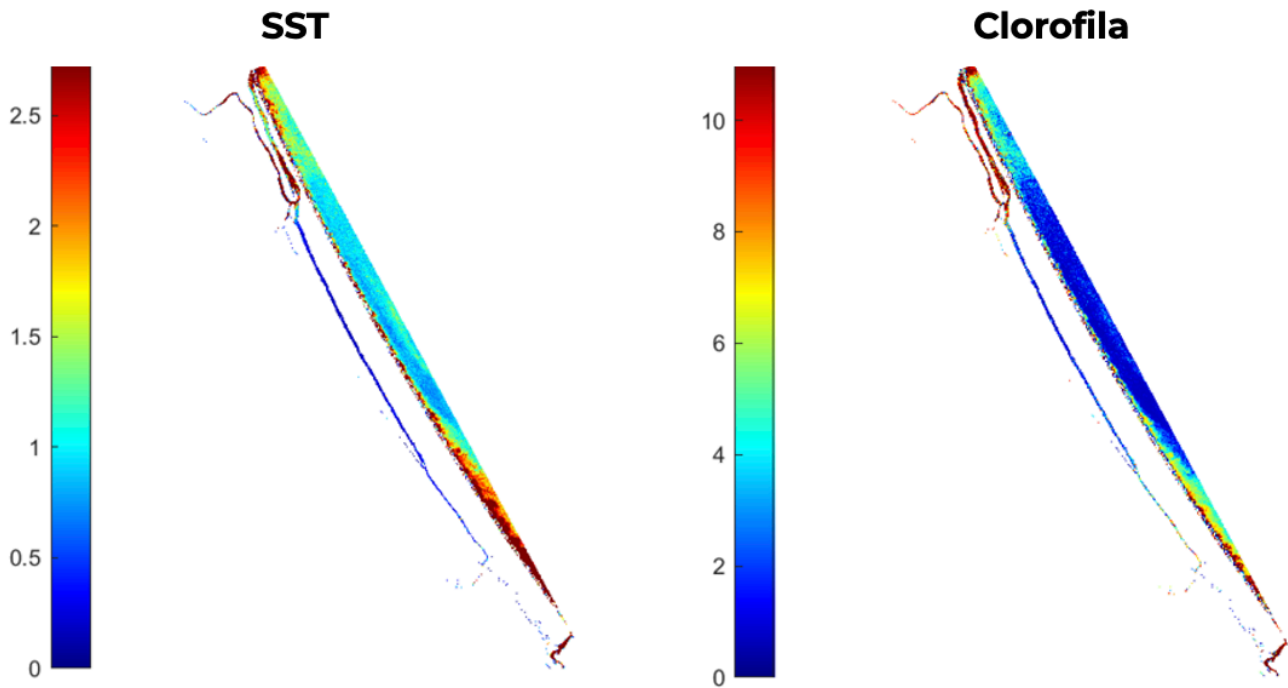


Figura 22. Perfil de concentraciones modeladas en el río Tortuguero con datos de enero 2022, para clorofila (izquierda) y sólidos suspendidos (derecha). Elaborado con el programa WASI.

Las figuras 19-21 corresponden a los meses de julio y agosto, es decir, época lluviosa que coincide con la campaña de muestreo in situ realizada para esta investigación. Se puede observar que en estos años se ha mantenido la baja concentración de particulado y clorofila durante la estación lluviosa y se muestra en las imágenes por la banda azul uniforme que se observa en el cauce completo del río. La figura 22 corresponde a la modelación espectral con datos de enero 2022, donde de igual manera se observa una banda azul uniforme correspondiente con baja presencia de clorofila y particulado a lo largo del cauce, y que ha sido reportada en estudios de calidad del río Tortuguero, también en época seca (12-13 marzo, 2020) [47]. Es decir, no se observan diferencias en los bajos contenidos de particulado y clorofila entre las épocas seca y lluviosa de los últimos años, con el método de teledetección.

En los perfiles de concentraciones modelados se observa que se mantienen las condiciones de baja concentración de clorofila y sólidos suspendidos en el período analizado (2019-2023), comparando los datos obtenidos con el Informe de Calidad del agua de los canales del PNT [47] en el 2020 y los datos obtenidos de análisis de laboratorio, se confirma la misma situación.

La metodología empleada para el desarrollo del análisis retrospectivo fue la misma del proyecto “Water quality monitoring in Terraba Sierpe Wetland (Costa Rica) using multi and hyperspectral EO data”, el cual ha sido desarrollado por el Laboratorio PRIAS en conjunto con la Agencia Aeroespacial Alemana (DLR, por sus siglas en alemán), e indica que en sistemas tropicales bajo condiciones favorables, la técnica permite obtener resultados favorables para el estudio de sólidos suspendidos totales y en el caso de la clorofila significa un reto [53]. Sin embargo, la técnica muestra la capacidad cualitativa para generar un sistema de monitoreo a largo plazo mediante perfiles de concentraciones modelados, para el caso de sólidos suspendidos y clorofila.

Conclusiones

El ajuste de la función espectral obtenida con datos satelitales y la firma espectral tomada en el sitio para cada uno de los puntos seleccionados permitió modelar la tendencia de los contenidos de clorofila y partículas suspendidas en el río Tortuguero. Sin embargo, aunque la técnica muestra ser útil para la modelación cualitativa de ambos parámetros, incluso en las condiciones de alta nubosidad de zonas tropicales, no fue posible cuantificar dentro de un error aceptable, obteniendo una sobreestimación considerable de la concentración en ambos parámetros, especialmente en clorofila. Aun así, la validación de los resultados efectuada por comparación con los datos de campo confirmó los bajos contenidos en todo el cauce del río Tortuguero, tanto en época lluviosa como en época seca. En época lluviosa se observó un ligero aumento en los niveles de sólidos suspendidos, con respecto a época seca, congruente con una mayor turbulencia en época lluviosa. En época seca se observó un aumento en los niveles de clorofila, congruente con la disminución de las corrientes, que producen acumulación de las plantas, sobre todo en el centro del río. En ambas épocas se muestran mayores valores de particulado en la zona de confluencia con otros ríos y presencia de actividad antropogénica, tanto en los datos obtenidos por modelación como en los análisis de laboratorio.

La sobreestimación de la modelación principalmente para la clorofila, puede relacionarse con la baja intensidad de la señal en la firma espectral y el error que introduce la reflexión del agua, especialmente cuando se tiene una menor concentración de los parámetros analizados, es decir, en la época en que se presentan lluvias. Dicho de otra manera, el alto porcentaje de error en la cuantificación puede deberse a que los algoritmos de bandas azul y verde de clorofila están diseñados para sistemas en los que la clorofila se presenta en grandes concentraciones, por lo que es el absorbente dominante y no en cantidades tan bajas. Esto se comprueba con el análisis de los resultados modelados en la época seca, donde las concentraciones de clorofila aumentan, el caudal es menor y la influencia de la reflectividad de fondo es menor, por lo que se obtiene una sobreestimación también menor (máximo época seca 429%, mientras que en época lluviosa es 913%), lo que significa que el límite de cuantificación del modelaje está determinado por las concentraciones mínimas y la influencia de la señal de fondo del agua en la modelación.

Por esta razón, aunque la tendencia general de los resultados modelados está en concordancia con los resultados obtenidos en el laboratorio, a este punto no se pueden usar como referencia de calidad normativa o evaluación del ecosistema. Por ejemplo, un dato de clorofila, como el del punto TORTU0206, podría ocasionar la clasificación del sistema como mesotrófico, de acuerdo con el OECD, por su contenido alto de clorofila, mientras que los datos de laboratorio ubican el sistema en oligotrófico.

De manera cualitativa, se encontró que los resultados obtenidos mediante el análisis retrospectivo de los perfiles de concentración modelados de clorofila y sólidos suspendidos indican condiciones estables que se han mantenido desde julio 2019 hasta marzo 2023. Esta tendencia se confirma por consulta de estudios reportados en el año 2020 y datos de laboratorio.

Recomendaciones

Se recomienda continuar con el estudio de imágenes satelitales de manera continua o sistemática, con el objetivo de monitorear el comportamiento a lo largo del tiempo en las aguas de la zona de estudio, lo cual permitiría dar seguimiento a la tendencia de los parámetros de calidad del agua estudiados en el río Tortuguero. Este seguimiento es pertinente sobre todo en la parte del río que tiene más arrastre de material, es decir, en la zona de convergencia de los ríos Sierpe, Jiménez y Pacuare, que están además influenciados por actividades antropogénicas.

Se sugiere explorar nuevos ajustes de la función espectral mediante datos satelitales y la firma espectral del sitio de estudio para este y otros análisis relacionados con calidad de aguas superficiales, y buscar en la literatura metodologías que permitan eliminar el efecto del fondo reflectivo del agua, con el fin de mejorar la capacidad de cuantificación de esta metodología.

Referencias

- [1] M. Mas, “Uso de la teledetección y los SIG en la vigilancia de la calidad del agua: Aplicación al Mae Menor”. Universidad Politécnica de Cartagena, España (2017).
- [2] T. M. Smith, R. L. Smith, *Ecología. 6ta ed. Madrid, España: Pearson Educación. pp. 776.*(2007).
- [3] SINAC, “Parque Nacional Tortuguero” (2021).
- [4] K. C. Clarke, J. R. Jensen, *Remote Sensing of the Environment An Earth Resource Perspective* (2007).
- [5] M. H. Gholizadeh, A. M. Melesse, L. Reddi, “A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques”. *Sensors (Switzerland)*. **16** (2016), , doi:10.3390/s16081298.
- [6] J. C. Ritchie, P. V. Zimba, J. H. Everitt, “Remote sensing techniques to assess water quality”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **69** (2003), pp. 695–704.
- [7] E. Chuvieco, *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio* (2008;http://www.slideshare.net/alinelabelen/savedfiles?s_title=teledeteccion-ambiental-listo&user_login=jaiflo7503), vol. 3.
- [8] C. A. Vargas, “Evaluación del uso de la teledetección para determinar parámetros de la calidad del agua en el embalse de la planta hidroeléctrica de Cachí”. *Universidad de Costa Rica* (2017).
- [9] S. P. Mertikas, P. Partsinevelos, C. Mavrocordatos, N. A. Maximenko, in *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering* (Elsevier, 2020), pp. 107–163.

- [10] C. Peri, “Descubrimiento de la radiación no térmica”. *Instituto Argentino de Radioastronomía* (2012).
- [11] E. Cadena Muñoz, H. J. Eslava Blanco, J. A. Franco Calderón, “Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia”. *Revista Tecnura*. **19**, 159 (2015).
- [12] NASA, “Earth Observatory”. *Earth Observatory* 3, 180-184 (2016).
- [13] Natural Resources Canada, “Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing Government of Canada 258” (2016).
- [14] Y. Álvarez, “Aplicación de la tecnología S.I.G. al estudio del riesgo y prevención de incendios forestales en el área de Sierra Espuña-Gebas”. *Universidad de Murcia* (2000).
- [15] R. González-Cascón, J. Pacheco-Labrador, M. P. Martín, Evolución del comportamiento espectral y la composición química en el dosel arbóreo de una dehesa. *Revista de Teledetección*. **2016**, 31–43 (2016).
- [16] M. Mas, “Uso de la teledetección y los SIG en la vigilancia de la calidad del agua: Aplicación al Mae Menor”. Universidad Politécnica de Cartagena, España (2017).
- [17] S. Ormeño, “Teledetección Fundamental 3ra Edición”. *Universidad Politécnica de Madrid* (2006).
- [18] J. A. Domínguez Gómez, C. Marcos Martín, Y. Chao Rodríguez, G. Delgado Rojas, D. Rodríguez Pérez, *Estudio de aguas continentales mediante teledetección*. (2011).
- [19] H. J. Kramer, *Observation of the Earth and its environment: survey of missions and sensors. 3rd edition* (Springer, 2016).

- [20] European Space Agency, “Types of orbits” (2020).
- [21] Sharing Earth Observation Resources, “Copernicus: Sentinel-2 The Optical Imaging Mission for Land Services” (2021).
- [22] Satellite Imaging Corporation, “Sentinel-2A Satellite Sensor 10 m” (2021).
- [23] European Space Agency, “Sentinel-2MSI Technical Guide” (2020).
- [24] USGS, “Landsat Missions-Landsat 8” (2017).
- [25] J. G. Rejas, “Tratamiento Digital de las Imágenes”. *Maestría en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua*. EOI (2008).
- [26] H. Aguilar Arias, R. Mora Zamora, C. Vargas Bolaños, Metodología para la corrección atmosférica de imágenes aster, RapidEye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo Flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*. 2 (2015), doi:10.15359/rgac.2-53.2.
- [27] J. Delegido, C. Tenjo, A. Ruiz-Verdú, R. Peña, J. Moreno, “Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y 3. Validación con imágenes HICO”. *Revista de Teledeteccion*, 37–47 (2014).
- [28] L. Jiménez, “Evaluación del uso de teledetección para determinar clorofila, turbidez y sólidos en suspensión en la desembocadura del Río Abangares”. Trabajo Final de Graduación, *Universidad de Costa Rica* (2014).
- [29] D. Wei, G. Yuan, F. Simon, “Seasonal characteristics of chlorophyll- A and its relationship with environmental factors in Yunmeng Lake of China”. *Journal of Environmental Biology*. **37**, 1073–1076 (2016).

- [30] H. W. Paerl, J. T. Scott, Throwing fuel on the fire: Synergistic effects of excessive nitrogen inputs and global warming on harmful algal blooms. *Environmental Science and Technology*. **44** (2010), pp. 7756–7758.
- [31] P. Dorji, P. Fearn, M. Broomhall, “A semi-analytic model for estimating total suspended sediment concentration in turbid coastal waters of northern Western Australia using MODIS-Aqua 250 m data”. *Remote Sensing*. **8** (2016), doi:10.3390/rs8070556.
- [32] W. Chen *et al.*, “Possibility of using multiscale normalized difference vegetation index data for the assessment of total suspended solids (TSS) concentrations in surface water: A specific case of scale issues in remote sensing”. *Environmental Research*. **194** (2021), doi:10.1016/j.envres.2020.110636.
- [33] R. J. Rickson, “Can control of soil erosion mitigate water pollution by sediments?” *Science of the Total Environment*. **468–469**, 1187–1197 (2014).
- [34] N. M. DeLuca, B. F. Zaitchik, F. C. Curriero, “Can multispectral information improve remotely sensed estimates of total suspended solids? A statistical study in Chesapeake Bay”. *Remote Sensing*. **10** (2018), doi:10.3390/rs10091393.
- [35] American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *American Water Works Association*, 541 (1999).
- [36] F. P. Maciel, P. E. Santoro, F. Pedocchi, “Spatio-temporal dynamics of the Río de la Plata turbidity front; combining remote sensing with in-situ measurements and numerical modeling”. *Continental Shelf Research*. **213** (2021), doi:10.1016/j.csr.2020.104301.
- [37] Ministerio de Ambiente y Energía, “Decreto N°33903-MINAE-S.16” (2007).

- [38] P. Gege, “The Water Colour Simulator WASI: User manual for WASI version 6”. *German Aerospace Center* (2021).
- [39] P. Gege, “WASI-2D: A software tool for regionally optimized analysis of imaging spectrometer data from deep and shallow waters”. *Computers and Geosciences*. **62**, 208–215 (2014).
- [40] H. Aguilar, “Tutorial ENVI 5.1 I Parte Introducción al software y procesamiento de imágenes MASTER” *CeNAT, Laboratorio PRIAS* (2015).
- [41] A. Casella, N. Barrionuevo, A. y Pezzola, C. Winschel, “PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES DEL SENSOR SENTINEL 2A y 2B CON EL SOFTWARE SNAP 6 .0”. *Instituto de Clima y Agua. C.I.R.N. INTA Castelar*, 1–31 (2018).
- [42] D. Garay, J. Agüero, “Introducción a los SIG, Software QGIS”. *Sistemas de Información y Ordenamiento Territorial EEA. La Rioja* (2016).
- [43] SINAC, “Parque Nacional Tortuguero” (2021).
- [44] G. Barrantes, “Análisis integral del Parque Nacional Tortuguero ”. *Área de Conservación Tortuguero* (2006).
- [45] Comisión Europea, “Información geográfica, teledetección y los Objetivos de Desarrollo Sostenible” (2018).
- [46] J. Rojas “Modelaje de la concentración del ion nitrato en las aguas superficiales de Costa Rica”. *Instituto Tecnológico de Costa Rica* (2022).
- [47] F. Quesada, L. Bolaños, A. Corrales, “Calidad del agua de los canales del Parque Nacional Tortuguero, Costa Rica”. *SINAC* (2020).

- [48] OECD, “Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Cooperative Programmers on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control)” Environment Directorate, OECD Paris, Final Report, France (1982).
- [49] MA-DINACEA, “Monitoreo - Calidad de Agua: Manual de Monitoreo”. División Calidad Ambiental. Departamento Seguimiento de Componentes del Ambiente, Uruguay (2021).
- [50] C. L. Brenes Rodríguez, R. Benavides Morera, S. Loza Álvarez, Descripción de la distribución espacial de la clorofila a, temperatura y salinidad en la plataforma y el talud continentales del Caribe centroamericano. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*. 9, 41 (2017).
- [51] C. Kuhn *et al.*, “Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity”. *Remote Sensing of Environment*. **224**, 104–118 (2019).
- [52] J. F. Hernández., L. Hernández., “Aplicación de Técnica de Teledetección al estudio de la turbidez de las aguas litorales en la Costa Oriental de Gran Canaria mediante un modelo teórico”. *Vegueta*, **7** (2003), pp. 229-240.
- [53] N. Pinnel., P. Gege., C. Miller., I.A. Pérez., S. Plattner., R. de los Reyes., T. Schwarzmaier., “Water quality monitoring in Terraba Sièrpe Wetland (Costa Rica) using multi- and hyperspectral EO data”. German Aerospace Center (DLR), Earth Observation Center (EOC), 82234 Wessling, Germany. Centro Nacional de Alta Tecnología Laboratorio CENAT - PRIAS, San José, Costa Rica.

Anexos

ANEXO 1. Resultados de clorofila-a reportados por Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos LASEQ - Gira 1.



LSQ-PG01-F06
Versión: 07/ Revisión: 00
Rige a partir de: 24 de marzo del 2021

INFORME DE ANÁLISIS

Consecutivo: 11476-22
Solicitante:
Fundación Centro Nacional de Alta Tecnología
Establecimiento: NA
Atención: Yakelyn Bejarano
Tel: 2519-5838

Muestreo: 2022/07/29
Recepción: 2022/08/23
Inicio del análisis: NA
Fin del análisis: NA
Informe: 2022/09/15

Resultado del análisis químico realizado a diez muestras de agua a las que se les determinó el contenido de Clorofila A**. Las muestras fueron identificadas de la siguiente manera:

Cuadro N°1. Identificación

Código LASEQ	Descripción (código y nombre)
21922	TORTU0101
21923	TORTU0102
21924	TORTU0103
21925	TORTU0104
21926	TORTU0105
21927	TORTU0106
21928	TORTU0107
21929	TORTU0108
21930	TORTU0109
21931	TORTU0110

Cuadro N° 2. Resultados

Código LASEQ	Clorofila A (mg/m ³ ± 0,01)
21922	0,51
21923	5,53
21924	0,59
21925	1,02
21926	5,36
21927	2,47
21928	4,17
21929	1,87
21930	2,05
21931	2,04

Editado e impreso por: LASEQ
Todos los Derechos Reservados
COPIA NO CONTROLADA

Página 1 de 2

“Al Servicio del Sector Productivo y la Comunidad Nacional”

INFORME DE ANÁLISIS

Consecutivo: **11476-22**
Solicitante:
Fundación Centro Nacional de Alta Tecnología
Establecimiento: NA
Atención: Yakelyn Bejarano
Tel: 2519-5838

Muestreo: 2022/07/29
Recepción: 2022/08/23
Inicio del análisis: NA
Fin del análisis: NA
Informe: 2022/09/15

Notas:

1. ****Ensayo NO acreditado.**
2. Las muestras fueron tomadas y llevadas al laboratorio por el personal del Laboratorio de Análisis Ambiental.
3. Dirección cliente: 1.3 km al Norte de la Embajada Americana, edificio CONARE Franklin Chand.
4. Metodología usada: método tricromático según el APHA 10200 Hc.
5. Este informe no podrá ser modificado en forma parcial o total sin la aprobación del LASEQ.
6. Los resultados de los análisis de este informe se refieren solamente a la muestra descrita en el mismo.
7. Para cualquier consulta refiérase al número de solicitud.

Bach. Joel Ramírez Alfaro
C.Q.C.R.N. I 3070
Director de Operaciones
Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos



Permiso Sanitario del Ministerio de Salud C.R.N.° CN-ARS-H-S-3831-2017.
Certificado Veterinario de Operación, CVO 069897-02, SENASA. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).
Apartado: 86-3000, Heredia, Costa Rica; Teléfonos: (506) 2277-3356;
Correo: laseq.una@gmail.com
-----ÚLTIMA LÍNEA-----

ANEXO 2. Resultados reportados por Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos CEQIATEC – Gira 1.



**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 1: Tortu0101	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	(29 ± 4)	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(100 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(27 ± 2)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 2: Tortu0102	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	(4,1 ± 0,6)	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(111 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(22 ± 2)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 3: Tortu0103	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	< 3	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(119 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(54 ± 3)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 4: Tortu0104	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	< 3	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(192 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(45 ± 3)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 5: Tortu0105	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	< 3	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(120 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(42 ± 2)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 6: Tortu0106	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	< 3	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(178 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(36 ± 2)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 7: Tortu0107	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	< 3	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(193 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(53 ± 3)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 8: Tortu0108	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	< 3	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(221 ± 2)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(78 ± 4)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23rd edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 9: Tortu0109	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	< 3	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(203 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(42 ± 2)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de análisis

Código de muestra: 2120822	Fecha de reporte: 14/09/2022
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 24/08/2022
Descripción de la muestra: consecutivo 10: Tortu0110	Fecha inicio análisis: 29/08/2022
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 29/07/2022
Muestreado por: El Solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) **	< 3	2540-D
Sólidos Disueltos totales (mg/L) **	(199 ± 1)	2540 C
Materia Orgánica disuelta (mg/L) **	(57 ± 3)	2540-E

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera de alcance de acreditación realizado por el solicitante. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

El ensayo de sólidos suspendidos supera el tiempo de análisis establecido por la norma de referencia.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

M Sc. Diana Robles Chaves
Regente Química



ANEXO 3. Resultados de clorofila reportados por Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos LASEQ - Gira 2.



INFORME DE ANÁLISIS

LSQ-PG01-R06

Versión: 09 / Revisión: 00

Rige a partir de: 07 de junio del 2022



Identificación

Consecutivo:
LASEQ-11795-23
Solicitante:
 Fundación Centro Nacional de Alta Tecnología
Establecimiento:
 No aplica
Atención:
 Yakelyn Bejarano
Teléfono:
 2519-5838
Dirección del cliente:
 1.30 km al Norte de la Embajada Americana, edificio
 CONARE Franklin Chang.
Código LASEQ:
22603
Descripción de muestra:
 TORTU 02(01 – 10)
Lote:
 No aplica
Fecha de vencimiento:
 No aplica
Matriz:
 No aplica
Análisis realizados:
 Determinación de Clorofila A**

Información de trazabilidad

Muestreado por:
 Personal Laboratorio de Análisis Ambiental
Muestreo:
 2023/03/17
Recepción:
 2023/03/23
Inicio del análisis:
 2023/03/23
Fin del análisis:
 2023/03/30
Emisión de Informe:
 2023/03/31

Resultados

Muestra	Clorofila A (mg/m ³)
Tortu 1	2,21 ± 0,02
Tortu 2	1,89 ± 0,02
Tortu 3	5,60 ± 0,02
Tortu 4	2,72 ± 0,02
Tortu 5	7,21 ± 0,02
Tortu 6	9,51 ± 0,02
Tortu 7	10,02 ± 0,02
Tortu 8	4,42 ± 0,02
Tortu 9	4,42 ± 0,02
Tortu 10	3,82 ± 0,02

Información adicional

1. Metodología descrita por el método Tricromático según el APHA 10200 Hc.
2. La incertidumbre expandida reportada se calculó con un nivel de confianza cercano al 95% utilizando un factor de cobertura k=2.
3. Los resultados de las muestras que no fueron muestreadas por el LASEQ aplican para la muestra tal y como fue recibida en el laboratorio.
4. ** Ensayo no acreditado.

-----ÚLTIMA LÍNEA-----

Lic. Joel Ramírez Alfaro
C.Q.C.R.N. 13070
Director Técnico
Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos



Permiso Sanitario del Ministerio de Salud C.R.N.° CN-ARS-H-S-3831-2017.

Certificado Veterinario de Operación, CVO 069897-02, SENASA. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).
 Apartado: 86-3000, Heredia, Costa Rica; Teléfonos: (506) 2277-3356; Correo: laseq.una@gmail.com

COPIA NO CONTROLADA

Página 1 de 1

Este informe no podrá ser modificado en forma parcial o total sin la aprobación del LASEQ. Los resultados de los análisis de este informe se refieren solamente a la muestra descrita en el mismo. Para cualquier consulta refiérase al número de solicitud.

"Al Servicio del Sector Productivo y la Comunidad Nacional"

ANEXO 4. Resultados reportados por el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos CEQIATEC – Gira 2.



**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 1: Tortu0201	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	(19 ± 2)	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(4 ± 1)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23ª edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 2: Tortu0202	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	(10 ± 2)	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(13 ± 3)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 3: Tortu0203	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	(10 ± 2)	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(1,1 ± 0,3)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr
 (**) Ensayos no acreditados.
 NA: No aplica
 ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23ª edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 4: Tortu0204	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	< 3	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(1,2 ± 0,3)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 28/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 5: Tortu0205	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	< 3	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(5 ± 1)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este período se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 6: Tortu0206	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	(4,0 ± 0,6)	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(3,3 ± 0,9)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr
 (**) Ensayos no acreditados.
 NA: No aplica
 ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.
 Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.
 Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.
 Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante
 Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.
 Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.
 Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 7: Tortu0207	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	(3,5 ± 0,5)	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(2,6 ± 0,7)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23ª edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 8: Tortu0208	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	(4,3 ± 0,7)	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(1,4 ± 0,4)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desearán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 9: Tortu0209	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	< 3	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(1,8 ± 0,5)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

)

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23^{ra} edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC
Informe de resultados de análisis**

Código de muestra: 2520323	Fecha de reporte: 30/03/2023
-----------------------------------	-------------------------------------

Información general	
Interesado: PRIAS CENAT	Teléfono: 8478-8912
Solicitante: Fabiola Solano Cerdas	Email: fasolano@estudiantec.cr
Datos muestras	
Tipo de muestra: Agua Superficial	Fecha recepción: 20/03/2023
Descripción de la muestra: consecutivo 10: Tortu0210	Fecha inicio análisis: 20/03/2023
Datos muestreo	
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 17/03/2023
Muestreado por: El solicitante	
Dirección: Provincia: Limón, otras señas: Tortuguero	

Análisis	Resultados	Procedimiento
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) *	< 3	2540-D
Turbiedad UNT (*)	(2,4 ± 0,6)	2130-B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

NA: No aplica

ND: No detectable

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación realizado por El Solicitante

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Las fechas de ejecución de las actividades corresponden desde la fecha de inicio del análisis hasta la fecha de reporte.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC

Metodología: Los análisis fueron realizados de acuerdo con los métodos descritos en el Manual de Procedimientos Técnicos de Química (PT-QU), basados en la 23ª edición del Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 2017.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

ANEXO 5. Información satelital extraída de USGS y Copernicus.		
Fecha	Fuente	Nombre
29/07/2022	USGS	S2A_MSIL1C_20220729T160521_N0400_R054_T16PHS_20220729T212052
15/01/2022	USGS	S2B_MSIL1C_20220125T160509_N0400_R054_T16PHS_20220125T193550
29/07/2021	USGS	S2B_MSIL1C_20210729T160519_N0301_R054_T16PHS_20210729T193708
23/08/2020	USGS	S2B_MSIL1C_20200823T160519_N0209_R054_T16PHS_20200823T194248
30/07/2019	USGS	S2B_MSIL1C_20190730T160519_N0208_R054_T16PHS_20190730T192816
16/03/2023	Copernicus	S2A_MSIL1C_20230316T160511_N0509_R054_T16PHS_20230316T210806

ANEXO 6. Cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas durante la Gira 1 y 2, debidas al consumo de combustible diésel y gasolina.

Debido al impacto generado en la atmosfera producto de las emisiones de gases de efecto invernadero, se procedió a compensar las emisiones generadas durante las giras de campo a causa del uso de combustibles fósiles como lo son el diésel y la gasolina. La compensación se realizó mediante el programa de compra de toneladas de CO₂e del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), la cual consiste en ingresar los litros de combustible consumidos y la calculadora se encarga de calcular las emisiones y las toneladas de CO₂ equivalente por compensar.

El consumo de diésel se debe al uso del vehículo empleado para transporte desde la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica hasta el embarcadero La Pavona y viceversa. El consumo de gasolina se debe al uso de lancha, tanto para transportarse del embarcadero La Pavona a la estación de Tortuguero y viceversa, como para el recorrido realizado durante los muestreos a través de los canales de Tortuguero.

A continuación se muestra el cálculo realizado para la estimación de toneladas de CO₂e. Los factores de emisión y potenciales de calentamiento global correspondientes fueron tomados del IMN (2022).

DESCRIPCIÓN CONSUMO COMBUSTIBLE GIRA 1 Y 2		
Descripción	Dato de Actividad (L)	Litros totales (Gira 1 y 2)
Diésel vehículo (ida y vuelta)	23,717	47,434
Total diésel (L)		47,434
Gasolina lancha pública (ida)	15,142	30,283
Gasolina lancha pública (vuelta)	15,142	30,283
Gasolina lancha muestreos	34,069	68,137
Total gasolina (L)		128,704

FACTORES DE EMISIÓN Y POTENCIALES DE CALENTAMIENTO GLOBAL TOMADOS DEL IMN, 2022.			
Descripción	Factor Emisión	Unidad	Potencial de Calentamiento Global
CO2 Diésel vehículo	2,613	kg CO2/Lcomb	1
CH4 Diésel vehículo	0,000149	kg CH4/Lcomb	21
N2O Diésel vehículo	0,000154	kg NO2/Lcomb	310
CO2 Gasolina lancha	2,231	kg CO2/Lcomb	1
CH4 Gasolina lancha	0,000907	kg CH4/Lcomb	21
N2O Gasolina lancha	0,000283	kg NO2/Lcomb	310

$$CO_2e = ((E CO_2 \times PCG CO_2) + (E CH_4 \times PCG CH_4) + (E N_2O \times PCG N_2O))/1000$$

Donde:

CO_2e : Emisión de dióxido de carbono equivalente por combustión (ton).

$E CO_2$: Emisión de dióxido de carbono por combustible fósil (kg CO₂).

$PCG CO_2$: Potencial de calentamiento global del dióxido de carbono.

$E CH_4$: Emisión de metano por combustible fósil (kg CH₄).

$PCG CH_4$: Potencial de calentamiento global del metano.

$E N_2O$: Emisión de óxido nitroso por combustible fósil (kg N₂O).

$PCG N_2O$: Potencial de calentamiento global de óxido nitroso.

$$CO_2e \text{ (diésel)} = ((123,944 \times 1) + (0,007 \times 21) + (0,007 \times 310))/1000$$

$$CO_2e \text{ (diésel)} = 0,126 \text{ ton } CO_2e$$

$$CO_2e \text{ (gasolina)} = ((287,138 \times 1) + (2,451 \times 21) + (11,291 \times 310))/1000$$

$$CO_2e \text{ (gasolina)} = 0,301 \text{ ton } CO_2e$$

$$CO_2e \text{ (total)} = 0,126 + 0,301$$

$$CO_2e \text{ (total)} = 0,427 \text{ ton } CO_2e$$

ANEXO 7. Calculadora y Certificado de compensación de emisiones de GEI generadas durante la Gira 1 y 2, debidas al consumo de combustible diésel y gasolina.

Consumo Combustible

1. Datos 2. Resultados 3. Compensar

Combustible: Gasolina Cantidad de Litros: 128.70 Catalizador:

Agregar

Borrar	Tipo de Combustible	Cantidad de Litros	CO ₂ -e.
	Diesel	47.43	0.126
	Gasolina	128.7	0.295

SUB-TOTAL: 0.42 ton CO₂-e



Costa Rica
Fondo Nacional de Financiamiento Forestal

Certificado de Compensación de emisiones de gases con efecto invernadero

No transferible, no comercializable

Fabiola Solano Cerdas

Emisiones compensadas

0.421 tCO₂e

Fecha: **03/04/2023**

Detalle de la transacción:

Descripción	Valor
Mensaje	Successful approval/completion
Número de Tarjeta	474581*****0716
Número de Operación	000000507
Monto de Compensación	\$3,16

Comprobante vinculado con Proyecto Forestal de Créditos de Carbono, desarrollado por Fonafifo en el marco de la Ley Forestal 7575, su reglamento y modificaciones. El dinero captado es aplicado en el Programa país de Pago por Servicios Ambientales, en actividades de mantenimiento o de recuperación de cobertura forestal. Estadísticas de PSA en: www.fonafifo.go.cr. Contacto: mercadeo@fonafifo.go.cr

Imprimir comprobante