

EVALUACIÓN DE ÍNDICES BIO-ÓPTICOS HIPERESPECTRALES PARA LA CLASIFICACIÓN DE CLOROFILA-A EN AGUAS COSTERAS – BAHÍA DE SECHURA, PERÚ

EVALUATION OF HYPERSPECTRAL BIO-OPTICAL INDICES FOR CHLOROPHYLL-A MAPPING IN COASTAL WATERS OF SECHURA BAY, PERU

Carlos Paulino^{1,*}  German Velaochaga¹  Marceliano Segura² 
Joo-Hyung Ryu³  Jun-Ho Lee^{2,4}  Jesús Ledesma⁵ 

¹ Instituto del Mar del Perú, Dirección General de Investigaciones en Hidroacústica, Sensoramiento Remoto y Artes de Pesca, Callao, Perú.

² Korea-Peru Research Center for Ocean Science and Technology for Latin America, Callao, Perú.

³ External Relations Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan, Republic of Korea.

⁴ Peru-Korea Joint Ocean Research Center, Global Cooperation Section, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan, Republic of Korea.

⁵ Instituto del Mar del Perú, Dirección General de Investigaciones de Oceanografía y Cambio Climático, Callao, Perú.

*Correspondencia. E-mail: cpaulino@imarpe.gob.pe

Recibido: 16-04-2026, Aceptado: 17-06-2026, Publicado: 22-07-2026

RESUMEN

Se presenta una clasificación de la concentración de clorofila-a (Chl-a) basada en la reflectancia de teledetección $R_{rs}(\lambda)$, medida con un radiómetro TriOS Ramses en la bahía de Sechura, en la costa norte de Perú, durante abril del 2024, agosto del 2024 y mayo del 2025. Se clasificaron 2332 firmas espectrales de reflectancia en tres clases de concentración de Chl-a: baja (<2,35 mg/m³), media (entre 2,35 a 7,36 mg/m³) y alta (>7,36 mg/m³), determinadas por los percentiles 33 y 67 del rango registrado entre 0,36 y 13,84 mg/m³. Se calcularon seis índices bio-ópticos a partir de bandas espectrales clave (443, 490, 555, 665 y 705 nm) y se evaluaron mediante pruebas de Kruskal-Wallis y análisis de correlación de Spearman. El índice GI presentó la asociación más fuerte con la clorofila-a ($\rho = 0,701$, $p < 0,001$), superando a los índices de borde rojo que se utilizan comúnmente en aguas costeras turbias. Se evaluaron tres modelos de clasificación supervisada, el Análisis Discriminante Lineal (LDA), el Bosque Aleatorio (RF) y el Análisis Discriminante de Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-DA), mediante validación cruzada (LOOCV). El LDA obtuvo la mayor precisión general (63,2 %, $\kappa = 0,446$) en los seis índices bio-ópticos, superando al RF (60,5 %, $\kappa = 0,407$) y al PLS-DA (60,5 %, $\kappa = 0,404$). La clase media de clorofila-a mostró una sensibilidad consistentemente baja en todos los modelos (entre el 25,0 y el 41,7 %), lo que refleja la superposición espectral inherente a las concentraciones de pigmentos de transición. Estos resultados demuestran la viabilidad de la discriminación de clases de clorofila-a, a partir de mediciones hiperespectrales de en aguas costeras ópticamente complejas y resaltan la necesidad de realizar mediciones simultáneas de materia orgánica disuelta coloreada y sedimentos en suspensión para mejorar el rendimiento de la clasificación de rango medio de la clorofila-a.

PALABRAS CLAVE: reflectancia de teledetección, clorofila-a, bio-óptica, análisis lineal discriminante, TriOS Ramses

ABSTRACT

This study evaluates the potential of hyperspectral bio-optical indices derived from remote-sensing reflectance, $R_{rs}(\lambda)$, for classifying chlorophyll-a (Chl-a) concentrations in the optically complex coastal waters of Sechura Bay, Peru. Reflectance measurements were acquired using a TriOS Ramses radiometer during field surveys conducted in April and August 2024 and May 2025. A total of 2,332 hyperspectral reflectance signatures were categorized into three Chl-a concentration classes: low (<2.35 mg/m³), moderate (2.35–7.36 mg/m³), and high (>7.36 mg/m³). Class thresholds were established using the 33rd and 67th percentiles of the observed concentration range (0.36–13.84 mg/m³). Six bio-optical indices based on selected spectral bands (443, 490, 555, 665, and 705 nm) were computed and assessed through Kruskal–Wallis tests and Spearman rank correlation analyses. Among the evaluated metrics, GI exhibited the strongest association with Chl-a concentration ($\rho = 0.701$, $p < 0.001$), surpassing the performance of red-edge indices commonly employed in turbid coastal environments. The classification capability of the indices was further examined using three supervised learning approaches: Linear Discriminant Analysis (LDA), Random Forest (RF), and Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA). Model performance was assessed using leave-one-out cross-validation (LOOCV). LDA yielded the highest

COMO REFERENCIAR ESTE ARTÍCULO (APA 7ed): Paulino, C., Velaochaga, G., Segura, M., Ryu, J.-H., Lee, J.-H. & Ledesma, J. (2026). Evaluación de índices bio-ópticos hiperespectrales para la clasificación de clorofila-a en aguas costeras – bahía de Sechura, Perú. *Bol Inst Mar Perú*, 41(2), e470. <https://doi.org/10.53554/boletin.v41i2.470>

overall classification accuracy (63.2 %, $\kappa = 0.446$) outperforming RF (60.5 %, $\kappa = 0.407$) and PLS-DA (60.5 %, $\kappa = 0.404$). Across all models, the moderate Chl-*a* class exhibited substantially lower sensitivity (25.0–41.7%) than the low- and high-concentration classes, indicating considerable spectral overlap within intermediate pigment regimes. The results demonstrate that hyperspectral measurements of can effectively support the classification of Chl-*a* concentration ranges in coastal waters characterized by complex optical properties. These findings also highlight the importance of concurrent measurements of colored dissolved organic matter and suspended sediments to improve classification performance, particularly for intermediate chlorophyll-*a* concentrations.

KEYWORDS: remote sensing reflectance, Chlorophyll-*a*, bio-optics, linear discriminant analysis, TriOS Ramses

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de la concentración de clorofila-*a* en aguas costeras ópticamente complejas sigue siendo un reto importante en la teledetección del color del océano, debido a la influencia conjunta de la materia orgánica disuelta coloreada (CDOM por sus siglas en inglés), el material suspendido total (MST) y las partículas no algales en la señal de reflectancia de salida del agua. Los algoritmos empíricos tradicionales, basados en las relaciones entre las bandas azul y verde, se han aplicado ampliamente en aguas claras de mar abierto, pero su rendimiento disminuye considerablemente en entornos costeros, donde la CDOM y los sedimentos inorgánicos aumentan la interferencia espectral en el dominio azul (MISHRA & MISHRA, 2012).

Para abordar esta limitación, se han desarrollado índices espectrales basados en el rojo y el NIR (*Near Infrared*), con el fin de aprovechar el pico de absorción del fitoplancton situado cerca de los 665 nm, y el pico de reflectancia alrededor de los 700 nm. MISHRA y MISHRA (2012) propusieron el índice de clorofila normalizado diferencial (NDCI), que demostró su mayor rendimiento que los algoritmos existentes en aguas turbias y productivas, con un $R^2 = 0,95$ en datos simulados y un $R^2 = 0,90$ con imágenes satelitales MERIS en sistemas costeros geográficamente diversos, como la bahía de Chesapeake y el delta del río Misisipi. De manera similar, el algoritmo de tres bandas propuesto por GITELSON *et al.* (2009) utiliza la reflectancia inversa a 665 nm, minimizada por la banda NIR, para reducir aún más la interferencia del MST y el CDOM, y ha sido validado en aguas continentales y costeras eutróficas con un R^2 superior a 0,94.

La diversidad de tipos ópticos de agua que se observan en los entornos costeros ha mo-

1. INTRODUCTION

Estimating chlorophyll-*a* (Chl-*a*) concentrations in optically complex coastal waters remains a significant challenge in ocean color remote sensing due to the combined influence of colored dissolved organic matter (CDOM), total suspended matter (TSM), and non-algal particles on the water's output reflectance signal. Traditional empirical algorithms, based on the relationships between blue and green bands, have been widely applied in clear open ocean waters, but their performance drops considerably in coastal environments, where CDOM and inorganic sediments increase spectral interference in the blue domain (MISHRA & MISHRA, 2012).

To address these limitations, red and near-infrared (NIR) spectral approaches have been developed, exploiting the phytoplankton absorption feature near 665 nm and the reflectance peak around 700 nm. Among the most widely used methods, the Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) proposed by MISHRA and MISHRA (2012) showed strong performance in productive and turbid waters ($R^2 = 0.95$ in simulations and $R^2 = 0,90$ when applied to MERIS imagery from diverse coastal systems, including Chesapeake Bay and the Mississippi River Delta). Similarly, the three-band model of GITELSON *et al.* (2009) reduces TSM and CDOM interference using reflectance at 665 nm and an NIR reference band, achieving R^2 values above 0,94 in eutrophic inland and coastal waters.

The diversity of optical water types observed in coastal environments has motivated the development of classification-based approaches that assign chlorophyll-*a* (Chl-*a*) estimation algorithms according to the dominant optical

tivado el desarrollo de enfoques basados en la clasificación que asignan algoritmos de estimación de la clorofila-a (Chl-a) según el régimen óptico dominante, en lugar de aplicar un único modelo universal. TRAN *et al.* (2023) evaluaron modelos de inversión de relación de bandas para estimar la clorofila-a a partir de imágenes MSI (*MultiSpectral Instrument*) de Sentinel-2 y OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*) de Sentinel-3, utilizando un extenso conjunto de datos in situ de reflectancia y clorofila-a. Clasificaron cinco tipos ópticos de agua (OWT – *Optical Water Types*) y demostraron que los modelos azul/verde son adecuados para aguas claras a moderadamente turbias, mientras que los modelos rojo/NIR lo son más para entornos turbios con alta concentración de Chl-a.

A pesar de los importantes avances en la clasificación de la concentración de clorofila-a en categorías ecológicamente significativas a partir de mediciones hiperespectrales in situ, en el Perú aún no se ha realizado este tipo de investigaciones sobre las características bio-ópticas superficiales de los ecosistemas costeros del mar peruano que permitan clasificar la concentración de clorofila-a para evaluar la productividad e identificar eventos extremos.

En el marco del convenio entre el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y el *Korea Institute of Ocean Science and Technology* (KIOST) se llevaron a cabo tres operaciones en el mar entre los años 2024 y 2025 en la bahía de Sechura, en la región Piura, cuyo objetivo fue estudiar las características bio-ópticas superficiales del mar mediante mediciones hiperespectrales y parámetros ambientales.

El objetivo de este estudio es clasificar la concentración de clorofila-a a partir de índices bio-ópticos utilizando datos hiperespectrales in situ para identificar la influencia óptica y la aportación de cada índice a la señal espectral de la clorofila-a y evaluarlos posteriormente con métodos de clasificación supervisada.

regime, rather than applying a single universal model. TRAN *et al.* (2023) evaluated band-ratio inversion models for estimating chlorophyll-*a*, from Sentinel-2 MSI (*MultiSpectral Instrument*) and Sentinel-3 OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*) imagery, using an extensive in situ dataset of reflectance and chlorophyll-*a* measurements. They classified five Optical Water Types (OWTs) and demonstrated that blue/green models are suitable for clear to moderately turbid waters, whereas red/NIR models perform better in turbid environments with high Chl-*a* concentrations.

Despite substantial advances in hyperspectral methods for chlorophyll-*a* retrieval and classification, studies addressing the bio-optical characteristics of Peruvian coastal waters remain limited. In particular, the use of *in situ* hyperspectral observations to classify Chl-*a* concentrations into ecologically relevant categories has received little attention, despite its potential value for monitoring ecosystem productivity, characterizing phytoplankton dynamics, and detecting anomalous environmental conditions.

To help address this knowledge gap, three oceanographic field campaigns were conducted in Sechura Bay, Piura, between 2024 and 2025 as part of a collaborative research program between the *Instituto del Mar del Perú* (IMARPE) and the Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST). These surveys collected hyperspectral radiometric measurements and complementary environmental data to characterize the surface bio-optical properties of this highly productive coastal ecosystem.

The present study aims to classify chlorophyll-*a* concentrations using bio-optical indices derived from in situ hyperspectral data. Specifically, we investigate the optical contribution and discriminatory capability of individual indices with respect to the Chl-*a* spectral signal and subsequently evaluate their performance using supervised classification techniques.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La bahía de Sechura se localiza entre los 5°05' y 5°20' de latitud sur y entre los 80°51' y 81°10' de longitud oeste, en la región Piura, en la costa norte del Perú. Tiene una extensión aproximada de 89 km de litoral (Fig. 1), donde se realiza pesca artesanal de recursos bentónicos y demersales, así como cultivo intensivo de la concha de abanico. La presencia de humedales, como el estuario de Virrilá, los manglares de San Pedro y Palo Parado y el río Piura, influyen estacionalmente en el ecosistema de la bahía, especialmente durante los eventos de El Niño.

Debido a su ubicación geográfica, abierta al océano y a la morfología del fondo marino, recibe el aporte de las aguas cálidas del norte y, principalmente, de las aguas costeras frías de la corriente costera peruana durante gran parte del año, lo que favorece la dinámica de circulación del agua que ingresa por la zona central y subsuperficial de la bahía (por debajo de los 10 m) con proyección sureste (hacia Matacaballo y el estuario de Virrilá) con intensidades de hasta 30 cm/s (Morón *et al.*, 2013).

2. MATERIALS AND METHODS

Study Area

Sechura Bay is located on the northern coast of Peru (5°05'–5°20' S, 80°51'–81°10' W) within the Piura region and encompasses approximately 89 km of coastline (Fig. 1). The bay supports extensive artisanal fisheries targeting benthic and demersal resources, as well as intensive aquaculture activities. Its ecological dynamics are seasonally influenced by adjacent coastal wetlands, including the Virrilá Estuary, the San Pedro and Palo Parado mangrove systems, and the Piura River, whose influence becomes particularly pronounced during El Niño events.

The hydrography of Sechura Bay is shaped by its open-ocean exposure and bathymetric configuration. Throughout most of the year, the bay is influenced by the interaction between warm northern waters and the colder waters associated with the Peruvian Coastal Current. These conditions promote a circulation pattern characterized by the intrusion of subsurface waters (<10 m depth) through the central sector of the bay, followed by southeastward transport toward Matacaballo and the Virrilá Estuary, with current velocities reaching up to 30 cm/s (Morón *et al.*, 2013).

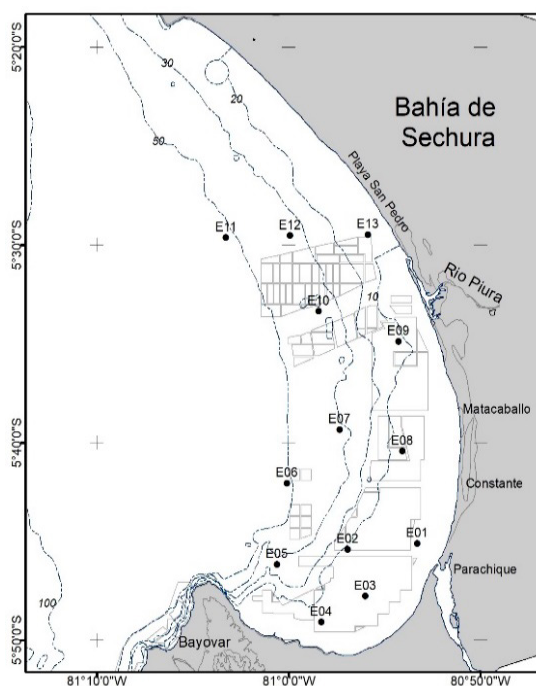


Figura 1.- Mapa de la bahía de Sechura con la ubicación de las 13 estaciones de muestreo

Figure 1. Map of Sechura Bay depicting the positions of the 13 sampling stations

La prospección marina se llevó a cabo los días 23 y 24 de abril, 14 y 15 de agosto del 2024, así como el 20 y 22 de mayo del 2025. Las estaciones de muestreo se ubicaron desde la zona costera hasta una distancia aproximada de 8 millas náuticas. En cada prospección marina se colectó información de 13 estaciones de muestreo a bordo de una embarcación artesanal de madera. Esta información consistió en mediciones radiométricas superficiales y en la recolección de muestras de agua para cuantificar la concentración de clorofila-a (Chl-a), la abundancia de fitoplancton, los sólidos suspendidos totales (SST), así como en la medición de la transparencia y de los parámetros de la temperatura superficial del mar (TSM) y la salinidad superficial del mar (SSM) (Tabla 1).

Field campaigns were conducted on 23 -24 April 2024, 14 -15 August 2024, and 20 -22 May 2025. Sampling stations extended from nearshore waters to approximately 8 nautical miles offshore. Each survey included 13 stations occupied aboard a wooden artisanal vessel. At each station, hyperspectral radiometric measurements were acquired and water samples were collected for chlorophyll-a (Chl-a), phytoplankton abundance, and total suspended solids (TSS) analyses. In addition, water transparency, sea surface temperature (SST), and sea surface salinity (SSS) were measured (Table 1).

Tabla 1.- Valores máximos y mínimos de los parámetros físicos y biológicos superficiales de las estaciones de muestreo en la bahía de Sechura en abril, agosto del 2024 y mayo del 2025

Table 1. Minimum and maximum values of surface physical and biological parameters at sampling stations in Sechura Bay during April and August 2024, and May 2025

Fecha	Número de estaciones	TSM (°C)	Salinidad	Clorofila-a (mg/m ³)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)
23/04/2024	8	17,24 – 19,38	34,85 – 35,11	2,25 – 11,35	15,5 – 23,90
24/04/2024	5	18,84 – 19,25	-	2,72 – 10,25	11,88 – 16,92
14/08/2024	8	16,10 – 18,20	35,05 – 35,10	0,58 – 1,37	3,77 – 27,86
15/08/2024	4	17,30 – 18,40	35,00 – 35,10	0,49 – 4,42	4,41 – 19,19
20/05/2025	8	18,30 – 21,50	-	3,17 – 13,84	3,68 – 31,00
22/05/2025	5	19,10 - 20,50	34,84 – 35,03	1,22 – 13,75	20,50 – 32,65

Mediciones radiométricas

La información radiométrica de la superficie del mar se registró con tres espectroradiómetros hiperespectrales TriOS Ramses, en el rango de 350 a 900 nm en intervalos de 5 segundos durante 5 minutos, registrándose un total de 2332 firmas espectrales de reflectancia correspondiente a 38 estaciones de muestreo válidas. Los sensores se montaron en un soporte de acero fijado en uno de los lados del bote para evitar la sombra del propio radiómetro (ESPINOZA VILLAR *et al.*, 2013). La posición de cada sensor se determinó según la geometría de adquisición propuesta por MOBLEY (1999). El sensor RAMSES-ACC con colector coseno, que detecta la luz procedente de arriba ($\alpha \leq 90^\circ$), se localizó en la parte superior apuntando al cenit, y se utilizó para medir la irradiancia total incidente sobre la superficie del agua ($E_s(\lambda)$) en $W\ m^{-2}$. Por otro lado, dos sensores RAMSES-ARC con un campo de visión (FOV) de 7° se utiliza-

Radiometric Measurements

Above-water radiometric observations were collected using three TriOS Ramses hyperspectral radiometers covering the spectral range from 350 to 900 nm. Measurements were recorded every 5 s over a 5-min sampling period, resulting in 2,332 valid reflectance spectra obtained from 38 sampling stations. The radiometers were mounted on a steel frame positioned alongside the vessel to minimize platform-induced shading effects (ESPINOZA VILLAR *et al.*, 2013). Instrument deployment followed the acquisition geometry recommended by MOBLEY (1999). The RAMSES-ACC sensor, equipped with a cosine collector for downward-directed light detection ($\alpha \leq 90^\circ$), was mounted atop the structure facing the zenith. This sensor measured total incident irradiance above the water surface ($E_s(\lambda)$), expressed in $W\ m^{-2}$. Two additional RAMSES-

ron para realizar mediciones de la radiación que sale del agua ($L_t(\lambda, \theta, \phi)$) y la radiación del cielo ($L_s(\lambda, \theta, \phi)$) en unidades de $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ (ADE *et al.*, 2023; Fig. 2). Considerando el Sol como referencia, los ángulos nadir (θ) y azimuth (ϕ) de L_t fueron de 40° y 135° , respectivamente, mientras que los ángulos nadir y azimuth de L_s fueron de 140° y 135° , respectivamente (DA SILVA *et al.*, 2021). A continuación, se calculó la reflectancia de teledetección (R_{rs}) utilizando la siguiente ecuación:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_t(\lambda) - \rho L_s(\lambda)}{E_s(\lambda)}$$

Donde ρ es un factor relacionado con la cantidad de L_s que se refleja en la interfaz agua-aire en la dirección del sensor, y es una función de la velocidad del viento, el ángulo cenital solar y los ángulos cenital y azimuthal del sensor. Se aplicó un valor de 0,028 para el factor de reflexión, ya que es adecuado para la geometría de adquisición utilizada y para velocidades del viento inferiores a 5 m/s en condiciones de cielo azul, o para cualquier velocidad del viento en cielos nublados (MOBLEY, 1999; DA SILVA *et al.*, 2021).

ARC sensors, each with a 7° field of view (FOV), were used to measure water-leaving radiance ($L_t(\lambda, \theta, \phi)$) and sky radiance ($L_s(\lambda, \theta, \phi)$) in $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ (ADE *et al.*, 2023; Fig. 2). With the Sun as reference, the nadir (θ) and azimuth (ϕ) angles were set to 40° and 135° , respectively, for L_t and to 140° and 135° , respectively, for L_s (DA SILVA *et al.*, 2021). Remote sensing reflectance (R_{rs}) was subsequently calculated using the following equation:

Where ρ is a factor related to the fraction of sky radiance (L_s) reflected at the air-water interface toward the sensor, and is a function of wind speed, solar zenith angle, and the sensor's zenith and azimuth angles. A reflection factor of 0.028 was applied, as this value is appropriate for the acquisition geometry used and for wind speeds below 5 m/s under clear blue skies, or for any wind speed under overcast conditions (MOBLEY, 1999; DA SILVA *et al.*, 2021).

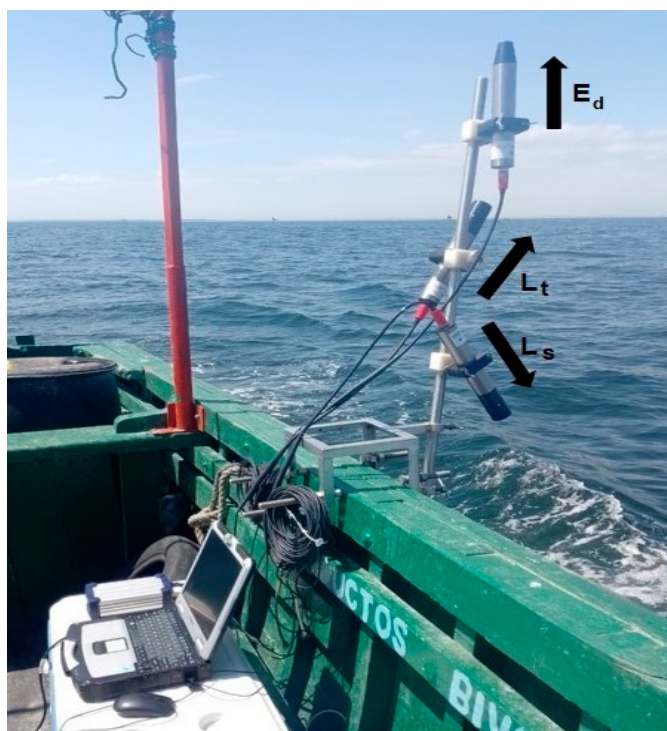


Figura 2.- Geometría de ubicación de los tres sensores TriOS Ramses, soportados sobre una estructura de acero situada en un lado de la embarcación (adaptado de MOBLEY, 1999)

Figure 2. Positioning geometry of the three TriOS Ramses sensors supported by a steel structure located on one side of the vessel (adapted from MOBLEY, 1999)

Determinación de clorofila-a

Para estimar la concentración de clorofila-a en las muestras de agua de 38 estaciones de monitoreo, se utilizó la técnica fluorométrica descrita por KNAP *et al.* (1996) con el fluorómetro Turner Design 10AU. El procedimiento consiste en filtrar 200 mL de agua de mar a través de filtros de microfibras de vidrio (Whatman GF/F de 0,75 μm), en los que queda retenida la clorofila-a. Luego, las muestras se acondicionan en sobres de papel glassine o de papel de aluminio, se rotulan y se trituran en 10 mL de acetona al 90 % con una varilla o con ultrasonidos de punto. Después, se maceran durante un mínimo de 24 horas y un máximo de 72 horas, a continuación, se centrifuga durante 5 minutos a 4500 rpm. Por último, se retira el sobrenadante para su lectura en el fluorómetro. Se realizó una primera lectura sin ácido (Fo) y, a continuación, una segunda lectura añadiendo 0,1 mL de HCl o dos gotas de HCl al 10 % en volumen (Fa). Antes de cada lectura, se enjuagaron las celdas con un mínimo de 2 mL de acetona al 90 %. Los valores medidos corresponden a Fo (sin ácido) y Fa (con ácido), que se utilizaron en la ecuación de cálculo.

Temperatura y salinidad del mar

La temperatura y la salinidad del mar se midieron con el mini CTD Castaway en la superficie y a diferentes profundidades, según la profundidad de la estación de muestreo.

Método

El proceso de clasificación espectral comienza con el pretratamiento de las firmas espectrales mediante un control de calidad en el que se eliminan mediciones atípicas debidas al movimiento de la embarcación, así como de los valores $R_{rs} < 0$ dentro del rango espectral de 400 a 750 nm seleccionado para este estudio. A continuación, se selecciona una firma espectral representativa para cada estación en función del análisis de la desviación estándar relativa (CV %) de cada longitud de onda (λ), lo que permite determinar el uso apropiado de la media o la mediana para cada firma espectral (Fig. 3).

Posteriormente, se calcularon índices bio-ópticos (Tabla 2) para estimar el contenido de clorofila-a y los constituyentes biológicos a partir de los da-

Chlorophyll-a Determination

Chlorophyll-a concentrations were determined for samples collected at the 38 monitoring stations following the fluorometric protocol described by KNAP *et al.* (1996) using a Turner Designs 10-AU fluorometer. Briefly, 200 mL seawater samples were filtered through Whatman GF/F glass-fiber filters (0.75 μm nominal pore size) to retain phytoplankton pigments. Filters were stored in glassine paper envelopes or aluminum foil, labeled, and subsequently homogenized in 10 mL of 90 % acetone using either a grinding rod or ultrasonic disruption. Samples were extracted for 24–72 h and then centrifuged at 4,500 rpm for 5 min. The resulting supernatant was analyzed fluorometrically. A first measurement was obtained before acidification (Fo) followed by a second measurement after adding 0.1 mL HCl or two drops of 10 % HCl solution (Fa). Prior to each measurement, fluorometer cuvettes were rinsed with at least 2 mL of 90 % acetone. The Fo and Fa readings were subsequently used to calculate chlorophyll-a concentration.

Sea Surface Temperature and Salinity

Sea temperature and salinity profiles were measured using a CastAway-CTD profiler. Measurements were acquired at the surface and throughout the water column according to the depth of each sampling station.

Method

The spectral classification workflow began with quality control of the hyperspectral reflectance data. Spectra affected by vessel motion or exhibiting negative $R_{rs} < 0$ values within the selected spectral range (400–750 nm) were discarded. A representative reflectance spectrum was then selected for each station based on the coefficient of variation (CV%) computed at each wavelength (λ), allowing the appropriate use of either the mean or median spectrum according to the variability observed within each dataset (Fig. 3).

Subsequently, several bio-optical indices (Table 2) were calculated from $R_{rs}(\lambda)$, to characterize chlorophyll-a and other optically active constituents. These included the Normalized

tos de reflectancia de teledetección $R_{rs}(\lambda)$, como el índice normalizado diferenciado de clorofila-*a* (NDCI), la razón de bandas $BR_{705/665}$, $BR_{665/490}$, el índice de altura de la línea de fluorescencia (FLH), el Green index (GI) y la razón de tres bandas. Además, se realizó una correlación entre índices bio-ópticos y Chl-*a* mediante el coeficiente de Spearman.

Difference Chlorophyll Index (NDCI), band ratios $BR_{705/665}$, $BR_{665/490}$, the Fluorescence Line Height (FLH), the Green Index (GI), and a three-band algorithm. Relationships between Chl-*a* concentration and bio-optical indices were assessed using Spearman rank correlation analysis.

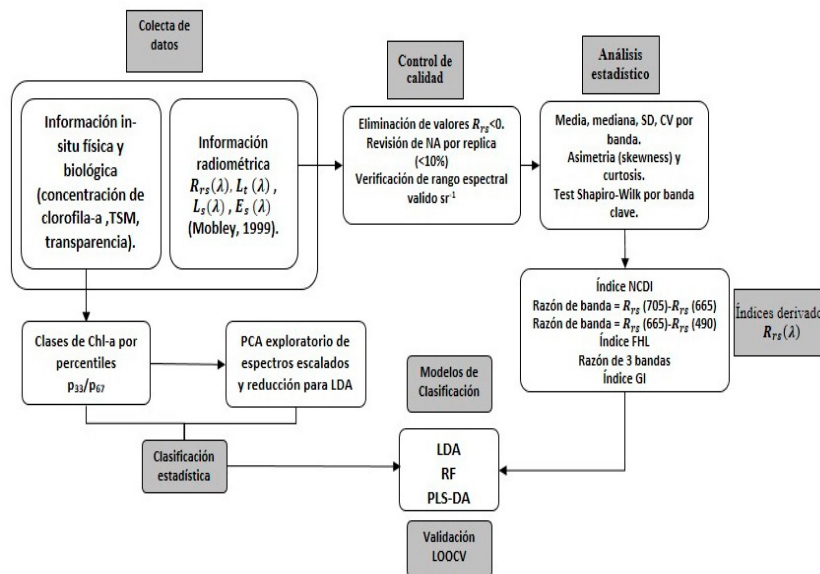


Figura 3.- Diagrama de flujo de la metodología para clasificar las firmas espectrales de teledetección con relación a la concentración de clorofila-*a*

Figure 3. Methodological flowchart for the classification of remote sensing spectral signatures based on chlorophyll-*a* concentration levels

Tabla 2.- Ecuaciones de índices bio-ópticos utilizados en la clasificación de reflectancia espectral y la clorofila-*a* con del sensor TriOS Ramses, basado en las referencias de cada índice de los sensores Meris, Seawifs y Modis

Table 2. Bio-optical index equations used for classifying spectral reflectance and chlorophylla from TriOS Ramses sensor data, based on indices from Meris, Seawifs, and Modis sensors

Índice	Región espectral	Ecuación	Referencia
NDCI	Rojo / Borde rojo	$NDCI = \frac{R_{rs}(705) - R_{rs}(665)}{R_{rs}(705) + R_{rs}(665)}$	MISHRA y MISHRA (2012)
BR_705/665	Borde rojo	$BR_{705/665} = \frac{R_{rs}(705)}{R_{rs}(665)}$	DALL'OLMO y GITELSON (2005)
BR_665/490	Rojo / Azul	$BR_{665/490} = \frac{R_{rs}(665)}{R_{rs}(490)}$	Adaptado de O'REILLY <i>et al.</i> (1998)
FLH proxy	Fluorescencia	$FLH_{proxy} = R_{rs}(685) - 0.5 \times [R_{rs}(665) + R_{rs}(705)]$	HUOT <i>et al.</i> (2005)
Tres bandas	Rojo-NIR	$3_{band} = \left[\frac{1}{R_{rs}(665)} - \frac{1}{R_{rs}(705)} \right] \times R_{rs}(740)$	GITELSON <i>et al.</i> (2009)
Green Index	Verde / Azul	$GI = \frac{R_{rs}(555)}{R_{rs}(490)}$	GILSON <i>et al.</i> (2010)

Con los índices calculados para cada firma espectral, se realizaron tres modelos supervisados: análisis discriminante lineal (LDA; FISHER, 1936), bosque aleatorio (RF; BREIMAN, 2001) y análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA; WOLD *et al.*, 2001). Los predictores fueron los seis índices bio-ópticos calculados a partir de $R_{rs}(\lambda)$. El rendimiento de los modelos se evaluó mediante validación cruzada “leave-one-out” (LOOCV) y se calcularon la precisión, el índice Kappa de Cohen (LANDIS & KOCH, 1977), la sensibilidad y la especificidad por clase. Para el procesamiento digital de las imágenes satelitales se utilizaron los programas informáticos SEADAS, SNAP y QGIS, mientras que para el análisis estadístico se usó RStudio.

3. RESULTADOS

3.1 Firmas espectrales superficiales

Las mediciones de reflectancia espectral recopiladas durante los tres estudios de campo realizados en la bahía de Sechura entre 2024 y 2025 revelaron una marcada variabilidad espacial y temporal en las propiedades ópticas de la superficie. Las variaciones en la forma espectral y la magnitud de la reflectancia se asociaron con cambios en la concentración de clorofila-*a*, la abundancia de fitoplancton, los sólidos en suspensión totales y condiciones ambientales como la radiación solar incidente y la nubosidad.

Los registros de información radiométrica del 23 y el 24 de abril 2024 muestran que las estaciones 1, 4, 5, 8 y 13, situadas más cerca de la costa, presentan dos picos de reflectancia. El primero se halla entre los 560 y los 590 nm, y el segundo, entre los 670 y 690 nm. Estos picos estarían asociados a una mayor abundancia de fitoplancton y a una mayor concentración de clorofila-*a*. Por el contrario, las estaciones 2, 7, 11 y 12, localizadas entre la zona media y el límite externo de la bahía, presentan características de aguas con menor productividad marina (Fig. 4).

Las firmas espectrales registradas en agosto 2024 indican una baja productividad marina, lo que contrasta con la información analizada sobre la abundancia de fitoplancton y la concentración superficial de clorofila-*a*. Durante este periodo, las estaciones 1 y 13 son las que presentan una mayor productividad marina, mientras que en

The resulting indices served as predictor variables for three supervised classification models: Linear Discriminant Analysis (LDA; FISHER, 1936), Random Forest (RF; BREIMAN, 2001), and Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA; WOLD *et al.*, 2001). The six bio-optical indices derived from $R_{rs}(\lambda)$ constituted the predictor set for all models. Model performance was evaluated using leave-one-out cross-validation (LOOCV). Classification accuracy, Cohen’s Kappa coefficient (LANDIS & KOCH, 1977), sensitivity, and specificity were calculated for each chlorophyll-*a* class. Satellite-image processing and visualization were conducted using SEADAS, SNAP, and QGIS, whereas statistical analyses were performed in RStudio.

3. RESULTS

3.1 Surface Reflectance Signatures

The hyperspectral reflectance measurements collected during the three field surveys conducted in Sechura Bay between 2024 and 2025 revealed pronounced spatial and temporal variability in surface optical properties. Variations in spectral shape and reflectance magnitude were associated with changes in chlorophyll-*a* concentration, phytoplankton abundance, total suspended solids, and environmental conditions such as incident solar radiation and cloud cover.

During the April 2024 survey, stations located in the coastal sector of the bay (stations 1, 4, 5, 8, and 13) exhibited a characteristic bimodal reflectance pattern, with a primary maximum between 560 and 590 nm and a secondary peak between 670 and 690 nm. This spectral configuration is commonly associated with productive waters characterized by elevated phytoplankton biomass and increased chlorophyll-*a* concentrations. In contrast, stations situated in the central and outer sectors of the bay (stations 2, 7, 11, and 12) displayed lower reflectance values and weaker spectral features, indicative of reduced biological productivity (Fig. 4).

The August 2024 survey exhibited a markedly different optical regime. Most stations showed relatively weak reflectance signals, consistent with lower phytoplankton biomass and chlorophyll-*a* concentrations. Only stations 1 and 13 retained spectral characteristics suggestive of enhanced productivity. In particular, the absence of a distinct reflectance

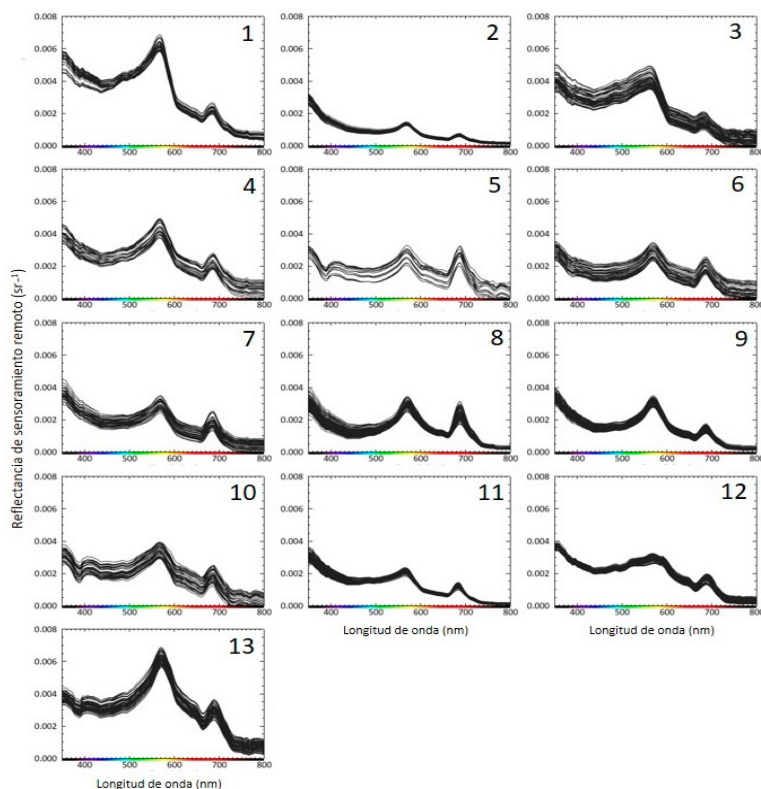


Figura 4.- Firma espectral de la superficie del mar de los 350 a 800 nm de las estaciones del 1 al 8 (23 de abril) y de las estaciones del 9 al 13 (24 de abril) del 2024

Figure 4. Sea surface spectral signatures in the 350–800 nm range recorded at stations 1–8 (April 23) and stations 9–13 (April 24), 2024

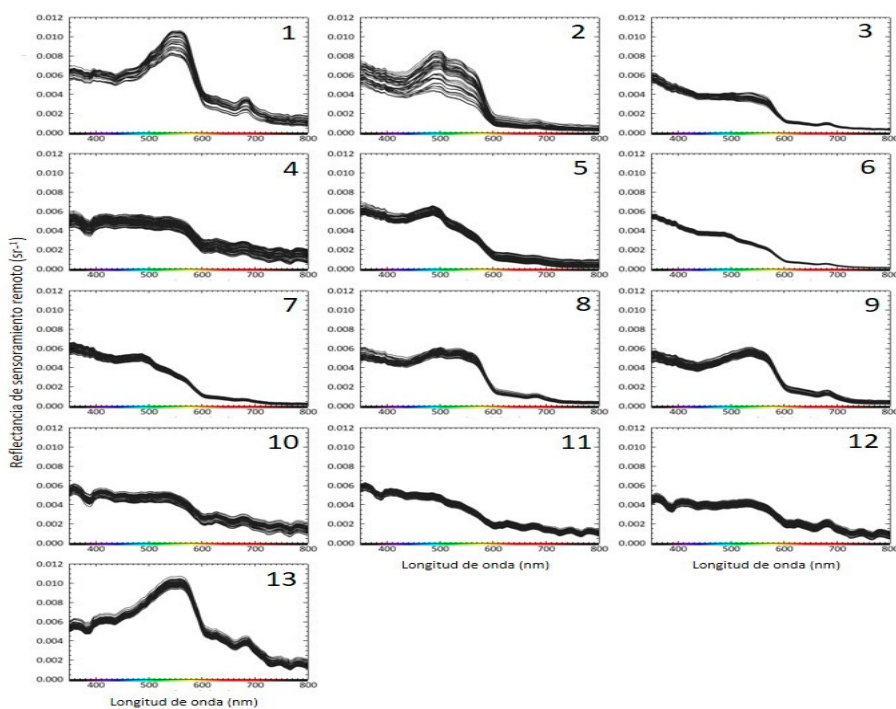


Figura 5.- Firma espectral de la superficie del mar de los 350 a 800 nm de las estaciones del 1 al 8 (14 de agosto) y de las estaciones del 9 al 13 (15 de agosto) del 2024

Figure 5.-Sea surface spectral signatures in the 350–800 nm range recorded at stations 1–8 (August 14) and stations 9–13 (August 15), 2024

las estaciones 3, 6, 7, 8 y 9 no se observan picos de reflectancia entre los 670 y los 700 nm, lo que indica una baja productividad (Fig. 5).

Durante agosto, la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) aumentó en siete estaciones costeras, con valores entre 16,18 y 27,86 mg/L, en relación con el mes de abril, cuyo valor máximo de SST fue de 23,9 mg/L. La amplia meseta de baja reflectancia y sin picos entre los 450 y los 580 nm, indica la presencia de sólidos suspendidos en todas las estaciones. La variabilidad de la concentración de los sólidos suspendidos totales está relacionada con las corrientes marinas en el interior de la bahía.

Los registros de reflectancia superficial del mar del 20 y el 22 de mayo 2025 indican una mayor productividad marina. Las estaciones costeras 1, 8, 9, 11 y 13 presentaron dos picos de reflectancia en los 580 y 690 nm. El primer pico podría indicar la presencia de fitoplancton con reflectancia de sensoramiento remoto superior a $0,0035 \text{ sr}^{-1}$, pero la baja amplitud alrededor de los 690 nm indicaría una baja concentración de clorofila-*a*, tal y como se observa en las estaciones 3, 5, 7 y 10 (Fig. 6).

maximum between 670 and 700 nm at stations 3, 6, 7, 8, and 9 suggests limited phytoplankton development and reduced Chl-*a* content (Fig. 5).

The optical characteristics observed during August coincided with elevated concentrations of suspended particulate matter. TSS values ranged from 16.18 to 27.86 mg/L at seven coastal stations, exceeding those measured during April, when the maximum concentration reached 23.90 mg/L. The broad low-reflectance plateau extending from approximately 450 to 580 nm is consistent with enhanced light scattering by suspended particles. The spatial distribution of TSS suggests that local circulation patterns play a key role in controlling sediment transport and retention within the bay.

The highest levels of biological productivity were observed during May 2025. Coastal stations 1, 8, 9, 11, and 13 exhibited well-defined reflectance maxima near 580 and 690 nm. The increase in reflectance around 580 nm, with values exceeding 0.0035 sr^{-1} , indicates elevated phytoplankton biomass. However, the relatively modest enhancement near 690 nm suggests moderate chlorophyll-*a* concentrations at several stations, including stations 3, 5, 7, and 10 (Fig. 6).

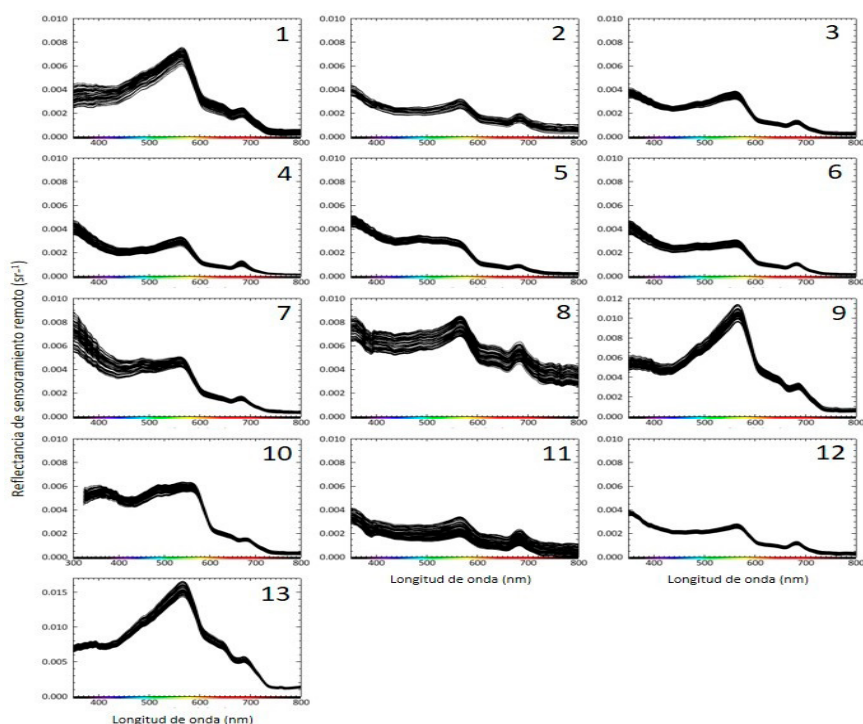


Figura 6.- Firma espectral de la superficie del mar de los 350 a 800 nm de las estaciones del 1 al 8 (20 de mayo) y de las estaciones del 9 al 13 (22 de mayo) del 2025

Figure 6. Sea surface spectral signatures in the 350–800 nm range recorded at stations 1–8 (May 20) and stations 9–13 (May 22), 2025

Por otro lado, las estaciones 7, 9, 10, 11 y 13, ubicadas en la zona norte de la bahía, presentaron un mayor contenido de sólidos suspendidos de aproximadamente 31,10 mg/L, lo que contrasta con los valores de transparencia del mar, registrados en una longitud de onda de 480 nm del espectro electromagnético.

Las firmas espectrales permitieron identificar preliminarmente zonas diferenciadas según la productividad marina en el interior de la bahía. El área alrededor de las estaciones 1, 4, 8, 9 y 13, que están cerca de la costa, corresponde, según los datos de clorofila-*a*, a una zona de mayor productividad marina. Sin embargo, esta productividad también se ve influenciada estacionalmente por la descarga del río Piura y del estuario de Virrilá. Otra zona de menor productividad marina, se localizó alrededor de las estaciones 10, 11 y 12, en la zona central de la bahía. Por último, se identificó una zona de baja productividad alrededor de las estaciones 2, 3, 5, 6 y 7.

3.2 Condiciones ambientales oceánicas de la bahía

La temperatura superficial del mar (TSM) promedio en la bahía de Sechura, registró valores de 18,48 °C y 17,17 °C en abril y agosto 2024, respectivamente; en tanto en mayo 2025 alcanzó 19,38 °C. Mientras tanto, la salinidad (SSM) osciló entre 34,85 y 35,11 durante el período analizado.

En cuanto a los sólidos suspendidos totales (SST), las concentraciones más altas se registraron en mayo, con ocho estaciones que superaron los 18 mg/L; cinco de ellas se encuentran en la zona norte de la bahía, con una media de 29 mg/L, probablemente debido a las descargas del río Piura. En agosto, las concentraciones más altas de SST se registraron en las estaciones ubicadas al sur de la bahía, con un promedio de 24 mg/L. Por otro lado, en abril, la concentración de SST fue relativamente menor en relación con los otros meses, con valores entre 11,88 y 23,90 mg/L.

Elevated suspended matter concentrations were also observed during May, particularly in the northern sector of the bay. Stations 7, 9, 10, 11, and 13 recorded mean TSS concentrations of approximately 31.10 mg/L. These observations were consistent with reduced water transparency and increased attenuation of blue wavelengths, particularly around 480 nm.

The analysis of hyperspectral signatures allowed the identification of distinct bio-optical regions within Sechura Bay. A highly productive coastal zone was identified around stations 1, 4, 8, 9, and 13, where elevated chlorophyll-*a* concentrations coincided with spectral features characteristic of phytoplankton-rich waters. The productivity of this sector is likely enhanced by seasonal freshwater and nutrient inputs from the Piura River and the Virrilá Estuary. An intermediate-productivity region was identified in the central portion of the bay around stations 10, 11, and 12, whereas stations 2, 3, 5, 6, and 7 consistently exhibited spectral characteristics associated with comparatively low biological productivity.

3.2 Oceanographic Conditions in Sechura Bay

Oceanographic conditions varied seasonally throughout the study period. Mean sea surface temperature (SST) was 18.48°C during April 2024 and decreased to 17.17°C in August 2024, reflecting the influence of cooler winter conditions. By May 2025, SST increased to 19.38°C. In contrast, sea surface salinity (SSS) remained relatively stable, ranging from 34.85 to 35.11.

Marked temporal differences were observed in suspended particulate matter concentrations. The highest TSS levels occurred during May 2025, when eight stations exceeded 18 mg/L. Five of these stations were located in the northern sector of the bay, where concentrations averaged approximately 29 mg/L, likely reflecting the influence of freshwater discharge and sediment transport from the Piura River. During August 2024, the highest TSS concentrations were recorded in the southern sector of the bay, averaging approximately 24 mg/L. In contrast, April exhibited comparatively lower TSS concentrations, ranging from 11.88 to 23.90 mg/L.

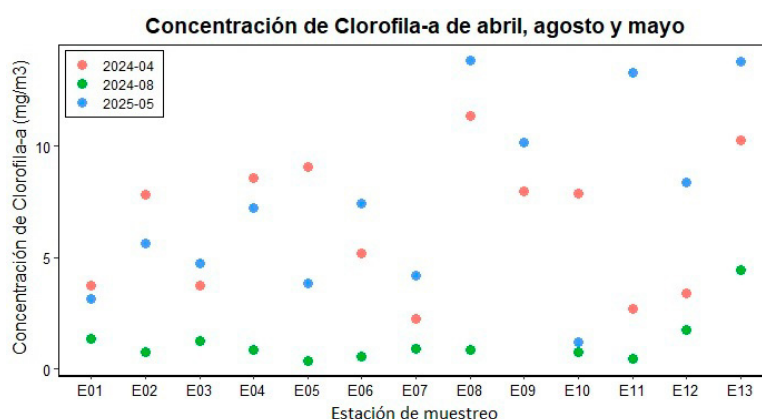


Figura 7.- Concentración de clorofila-a en cada estación de muestreo durante el período analizado

Figure 7. Chlorophylla concentrations recorded at each sampling station over the study period

3.3 Clasificación de clorofila-a

La concentración de clorofila-a (Chl-a) fue mayor en las estaciones costeras, con valores entre 0,36 y 13,84 mg/m³, propios de aguas oligotróficas a mesotróficas, como es habitual en la bahía de Sechura. Durante los meses de abril 2024 y mayo 2025, la concentración de Chl-a osciló entre 2,2 y 13,84 mg/m³, mientras que en agosto 2024 no superó los 1 mg/m³ en casi todas las estaciones. La estación 13 fue la que presentó la mayor concentración de Chl-a (4,42 mg/m³) como se muestra en la Figura 7.

La clorofila-a contrastó con la respuesta espectral registrada por el radiómetro. Las estaciones con concentraciones inferiores a 3 mg/m³ presentaron una reflectancia inferior a 0,003 sr⁻¹, mientras que las estaciones con altas concentraciones de clorofila-a presentaron una reflectancia superior a 0,006 sr⁻¹ alrededor de los 690 nm. Condiciones similares se observaron con los registros de abundancia de fitoplancton.

En abril, las firmas espectrales del mar presentaron dos picos de reflectancia: el primero entre los 550 y los 600 nm, y el segundo alrededor de los 700 nm. Estas firmas indican la presencia de fitoplancton, pero se observó que su forma es similar a la de las cuatro especies de fitoplancton analizadas por SCHALLES (2006). Destaca la firma espectral de la especie *Navicula* sp., que, curiosamente, también se identificó en todas las estaciones de muestreo.

3.3 Chlorophyll-a Classification

Chlorophyll-a concentrations ranged from 0.36 to 13.84 mg/m³, with the highest values generally occurring in coastal waters. These concentrations are consistent with oligotrophic to mesotrophic conditions commonly reported for Sechura Bay. During April 2024 and May 2025, Chl-a concentrations ranged from 2.2 to 13.84 mg/m³, whereas during August 2024 concentrations remained below 1 mg/m³ at most stations. The highest concentration was recorded at station 13 (4.42 mg/m³) (Fig. 7).

The spatial distribution of chlorophyll-a was strongly reflected in the hyperspectral measurements. Stations with Chl-a concentrations below 3 mg/m³ generally exhibited remote-sensing reflectance values lower than 0.003 sr⁻¹, whereas stations with elevated chlorophyll-a concentrations showed reflectance values exceeding 0.006 sr⁻¹ near 690 nm. Similar trends were observed in phytoplankton abundance, reinforcing the biological significance of the spectral response.

During April, most spectra exhibited two characteristic reflectance maxima: a broad peak between 550 and 600 nm and a second maximum near 700 nm. These spectral features are typical of phytoplankton-dominated waters and closely resemble the signatures described by SCHALLES (2006) for several phytoplankton taxa. Among them, the spectral pattern attributed to *Navicula* sp. showed the greatest similarity to the reflectance signatures observed in Sechura Bay, consistent with its occurrence across all sampling stations.

La concentración de clorofila-a *in situ* se clasificó en tres categorías (baja, media y alta) utilizando el criterio estadístico de los percentiles 33 y 67 de la distribución observada ($p_{33} = 2,35 \text{ mg/m}^3$; $p_{67} = 7,36 \text{ mg/m}^3$), obteniéndose tres clases equilibradas de 13, 12 y 13 estaciones, respectivamente, que muestran una clara separación en sus medias: baja ($1,036 \text{ mg/m}^3$), media ($4,337 \text{ mg/m}^3$) y alta ($9,972 \text{ mg/m}^3$). Esta separación es favorable para la clasificación, ya que las clases son distinguibles en el espacio espectral (Tabla 3). Por otro lado, para investigaciones con pocos registros, el tamaño de muestras requiere de al menos 10 observaciones por clase para estimar el error de los modelos usados en la evaluación de fiabilidad y precisión. El coeficiente de variación (CV) difiere notablemente entre las clases: $CV_{\text{baja}} = 51 \%$, $CV_{\text{media}} = 29 \%$ y $CV_{\text{alta}} = 24 \%$. El CV elevado en la clase baja es típico de concentraciones muy bajas de Chl-a, donde pequeñas diferencias absolutas generan una alta variación relativa. La clase alta es la más homogénea en términos relativos, lo que facilita su detección espectral.

For classification purposes, *in situ* Chl-a concentrations were divided into three categories --low, moderate, and high --using the 33rd and 67th percentiles of the observed distribution ($p_{33} = 2.35 \text{ mg/m}^3$; $p_{67} = 7.36 \text{ mg/m}^3$). This approach produced three nearly balanced groups comprising 13, 12, and 13 observations, respectively. Mean chlorophyll-a concentrations differed markedly among classes, averaging 1.036 mg/m^3 for the low class, 4.337 mg/m^3 for the moderate class, and 9.972 mg/m^3 for the high class. The clear separation among class means supports the use of these thresholds for supervised classification (Table 3). Moreover, in investigations with limited data, a minimum of 10 observations per class is required to estimate model errors when evaluating reliability and accuracy. The coefficient of variation (CV) varies considerably among classes: $CV_{\text{low}} = 51 \%$, $CV_{\text{moderate}} = 29 \%$, and $CV_{\text{high}} = 24 \%$. The elevated CV observed in the low class is characteristic of very low Chl-a concentrations, where minor absolute differences translate into high relative variability. In contrast, the high class exhibits the greatest relative homogeneity, which enhances its spectral detectability.

Tabla 3.- Clasificación de tres clases de concentración de clorofila-a por percentiles estadísticos de 33 y 67
Table 3. Classification of three chlorophylla concentration classes based on the 33rd and 67th statistical percentiles

Clase	Umbral de Chl-a	N	Chl-a SD (mg/m^3)	Media (mg/m^3)	Mediana (mg/m^3)	Estado trófico	Referencia
Baja	$<2,35 \text{ mg/m}^3$	13	0,528	1,036	0,868	Oligotrófico– Mesotrófico	VOLLENWEIDER y KEREKES (1982)
Media	$2,35\text{--}7,36 \text{ mg/m}^3$	12	1,237	4,337	4,03	Mesotrófico– Eutrófico	CARLSON (1977)
Alta	$>7,36 \text{ mg/m}^3$	13	2,369	9,972	9,04	Eutrófico– Hipereutrófico	VOLLENWEIDER (1992)

En las tres clases, la mediana es menor que la media, lo que indica distribuciones con asimetría positiva. Esto respalda metodológicamente la decisión de utilizar la mediana como firma espectral representativa de cada estación para la bahía de Sechura, en contraste con el protocolo NASA *Ocean Color* para aguas costeras Caso II (MUELLER *et al.*, 2003). Los umbrales obtenidos para cada clase coinciden con los límites entre los estados tróficos mesotrófico y eutrófico reportados para las aguas costeras tropicales (VOLLENWEIDER & KERKES, 1982; CARLSON, 1977), lo que refuerza la validez ecológica de los modelos de clasificación. Estos criterios garantizan que las clases de Chl-a tengan un tamaño equivalente para realizar la validación cruzada “leave-one-out” (LOOCV).

For all three classes, median values were lower than the corresponding means, indicating positively skewed distributions. This statistical characteristic supports the use of the median rather than the mean as the representative spectral signature for each station, differing from the standard NASA *Ocean Color* protocol commonly applied to Case II coastal waters (MUELLER *et al.*, 2003). Furthermore, the class thresholds derived from the percentile approach correspond closely to transitions between mesotrophic and eutrophic trophic states reported for tropical coastal ecosystems (VOLLENWEIDER & KERKES, 1982; CARLSON, 1977), providing ecological justification for the classification framework. The resulting balanced class structure also ensured adequate sample representation for leave-one-out cross-validation (LOOCV), thereby enhancing the robustness of model performance assessment.

3.4 Rendimiento de índices bio-ópticos

En la Figura 8, se observa que los seis índices bio-ópticos logran discriminar significativamente las tres clases de clorofila-*a*, lo que demuestra que la categorización está bien diferenciada. El valor estadístico H de Kruskal-Wallis para el índice Green Index (GI) en las 13 estaciones de clase alta es sistemáticamente el más alto, mientras que en las 13 estaciones de clase baja el valor es mínimo y en las 12 estaciones de clase media se sitúa en registros intermedios ($H=16,624$; Tabla 4).

3.4 Performance of Bio-Optical Indices

All six bio-optical indices successfully discriminated among the three Chl-*a* concentration classes, indicating that the classification scheme captured meaningful differences in the optical properties of Sechura Bay waters (Fig. 8). The Kruskal-Wallis H statistic calculated for the Green Index (GI) shows a systematic pattern: maximum values at the 13 stations falling into the high Chl-*a* class, minimum values at the 13 low-class stations, and intermediate values at the 12 medium-class stations ($H = 16.624$; Table 4).

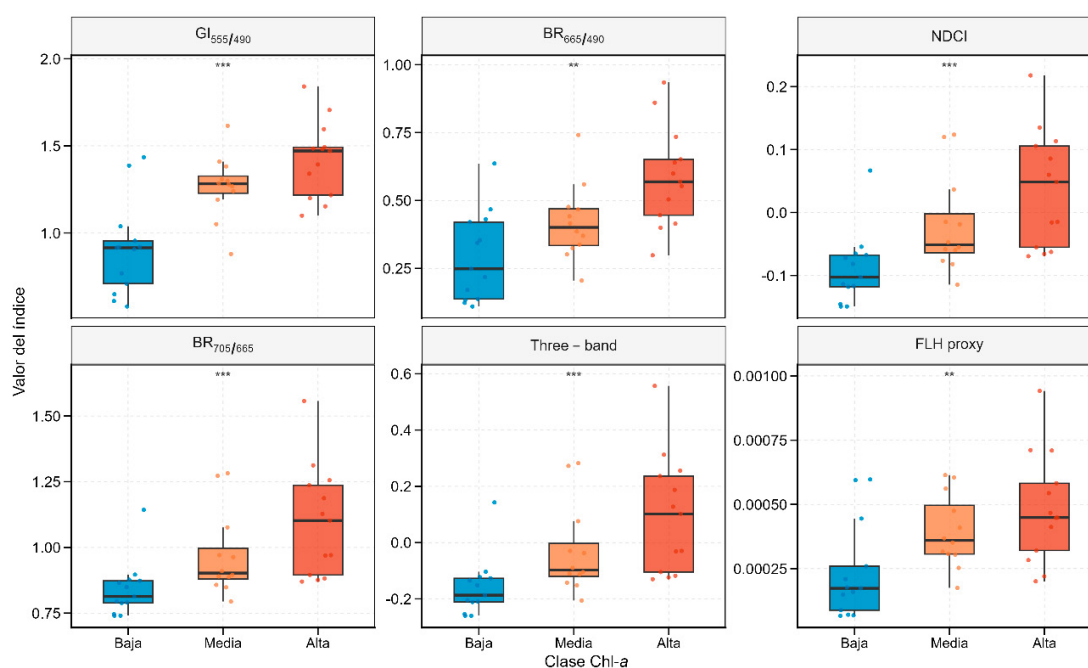


Figura 8.- Distribución de cada índice bio-óptico según clases de Chl-*a* (Baja, Media, Alta)

Figure 8. Distribution of each bio-optical index according to Chl-*a* classes (Low, Moderate, High)

Tabla 4.- Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis con ajuste de Benjamini-Hochberg de los índices bio-ópticos y el coeficiente de Spearman entre los índices y la Chl-*a*.

Table 4. Results of the Kruskal-Wallis test with Benjamini-Hochberg adjustment and Spearman's rank correlation coefficient between bio-optical indices and Chl-*a*

Índice	H	df	p-value	p.adj (BH)	Spearman's ρ
GI	16,624	2	0,00025	0,00092	0,701
BR _{705/665}	14,784	2	0,00062	0,00092	0,645
NDCI	14,784	2	0,00062	0,00092	0,645
3 _{band}	14,784	2	0,00062	0,00092	0,645
BR _{665/490}	13,151	2	0,00139	0,00167	0,658
FLH _{proxy}	10,530	2	0,00517	0,00517	0,607

p.adj (BH)=Benjamini-Hochberg false discovery rate correction, df=degrees of freedom($k-1=2$), H=Kruskal-Wallis statistic.

Los resultados indican que el índice de bandas GI, mostró la mayor correlación con la concentración de clorofila-a ($\rho = 0,701$, $p < 0,001$), superando al NDCI y al $BR_{705/665}$, lo que sugiere que en la bahía de Sechura, la reflectancia del fitoplancton se manifiesta principalmente en la región verde (555 nm) del espectro visible.

Los índices $BR_{705/665}$, NDCI y 3_{band} comparten idéntico poder discriminante ($H = 14,784$, $p_{adj} = 0,00092$), lo que refleja su dependencia matemática común en las bandas $R_{rs\ 665}$ y $R_{rs\ 705}$. En el caso de los índices $BR_{665/490}$ y el FLH_{proxy} , la discriminación fue ligeramente inferior, aunque también muy significativa ($H = 13,151$ y $10,530$, respectivamente; $p_{adj} < 0,01$). El rendimiento inferior del FLH_{proxy} probablemente refleje la atenuación de la señal de fluorescencia por dispersión en aguas costeras ópticamente complejas al estimarse con bandas espectrales amplias. Estos resultados confirman que los espectros R_{rs} in situ medidos con el radiómetro TriOS Ramses contienen información espectral estadísticamente sólida para discriminar las clases de concentración de Chl-a en la bahía de Sechura. Los estudios futuros que incorporen mediciones de componentes ópticamente activos que varíen conjuntamente, como el CDOM y la materia inorgánica en suspensión, podrían mejorar aún más el rendimiento de la clasificación.

El análisis de correlación de Spearman reveló asociaciones positivas entre los seis índices bio-ópticos y la concentración de Chl-a ($\rho = 0,607-0,701$, $p < 0,001$; Tabla 4). El Green index (GI) mostró la correlación más alta ($\rho = 0,701$), superando a los índices basados en el rojo/NIR que se recomiendan habitualmente para aguas costeras turbias.

El NDCI, el $BR_{705/665}$ y el índice de tres bandas presentaron coeficientes de correlación idénticos ($\rho = 0,645$), lo que concuerda con su dependencia matemática compartida de las bandas de 665 y 705 nm. A pesar de que el índice FLH es teóricamente específico para la fluorescencia activa de la clorofila-a, presentó la correlación más baja ($\rho = 0,607$), probablemente debido a la atenuación de la señal en

The superior performance of GI was corroborated by the correlation analysis, which revealed the strongest association with in situ Chl-a concentrations ($\rho = 0.701$, $p < 0.001$). This result exceeded those obtained for the NDCI and $BR_{705/665}$ indices, suggesting that, within Sechura Bay, phytoplankton reflectance manifests mainly in the green band (555 nm) of the visible spectrum.

The NDCI, $BR_{705/665}$, NDCI y 3_{band} and indices exhibited identical discriminatory performance ($H = 14.784$, adjusted $p = 0.00092$), reflecting their shared dependence on the $R_{rs\ 665}$ and $R_{rs\ 705}$ bands. Although $BR_{665/490}$ and FLH_{proxy} also showed statistically significant separation among classes, their discriminatory power was comparatively weaker ($H = 13.151$ y 10.530 , respectively; adjusted $p < 0.01$). In particular, the reduced performance of the probably results from scattering-induced attenuation of the fluorescence signal in optically complex coastal waters when broad spectral bands are used for estimation. These findings demonstrate that *in situ* R_{rs} spectra acquired with the TriOS Ramses radiometer provide statistically reliable spectral information for distinguishing Chl-a concentration classes in Sechura Bay. Incorporating measurements of covarying optically active constituents—such as CDOM and suspended inorganic particulate matter—in future studies may further enhance classification accuracy.

A Spearman correlation analysis showed that all six bio-optical indices were positively associated with Chl-a concentration, with correlation coefficients ranging from 0.607 to 0.701 ($\rho = 0.607-0.701$, $p < 0.001$; Table 4). The Green Index (GI) yielded the highest correlation ($\rho = 0.701$), exceeding the performance of red/NIR-based indices that are conventionally recommended for turbid coastal waters.

The NDCI, el $BR_{705/665}$, and threeband index yielded identical correlation coefficients ($\rho = 0.645$), which aligns with their common mathematical reliance on the 665 nm and 705 nm bands. The FLH index, despite being theoretically specific to active chlorophyll-a fluorescence, produced the lowest correlation (ρ

aguas ópticamente complejas. El GI refleja el desplazamiento del máximo de reflectancia hacia la banda del verde, a medida que aumenta la Chl-*a*, fenómeno característico de aguas del tipo Caso II, con mezcla de fitoplancton, CDOM y sedimentos, que hacen referencia investigaciones recientes. La predominancia de correlaciones positivas (matriz íntegramente roja) indica que todos los índices capturan la misma señal bio-óptica, lo que justifica el uso de GI como representante en modelos parsimoniosos (Fig. 9).

Los coeficientes de correlación de Spearman obtenidos (0,607 y 0,701), predicen teóricamente una precisión situada entre 60 a 65 % (Tabla 4) y es exactamente lo que se obtuvo (RF y PLS = 60,5 %, LDA = 63,2 %). Esto evidencia que los modelos están captando prácticamente toda la información disponible en los índices, sin que haya un subajuste significativo. El rendimiento está limitado por la superposición entre clases, especialmente en la clase media. Por otro lado, la Figura 10a muestra la relación entre el índice GI y la concentración de Chl-*a*, que presenta una regresión lineal ($R^2=0,406$, $\rho=0,701$, $p<0,0001$).

= 0.607), probably as a result of signal attenuation in optically complex coastal waters. The GI captures the displacement of the reflectance peak toward the green band with increasing Chl-*a* concentration—a typical feature of Case II waters containing mixtures of phytoplankton, CDOM, and suspended sediments, as documented in recent studies. The consistently positive correlations (an entirely red correlation matrix) demonstrate that all indices respond to the same biooptical signal, supporting the use of GI as a parsimonious model representative (Fig. 9).

The Spearman correlation coefficients obtained (ranging from 0.607 to 0.701) theoretically predict an accuracy of 60–65 % (Table 4), which matches the observed model performance (RF and PLS = 60.5 %, LDA = 63.2 %). This indicates that the models are extracting virtually all the information embedded in the indices, with no evidence of significant underfitting. Classification performance is constrained by class overlap, most notably in the medium class. Additionally, Figure 10a illustrates the relationship between the GI index and Chl-*a* concentration, which is well described by a linear regression ($R^2=0.406$, $\rho=0.701$, $p<0.0001$).

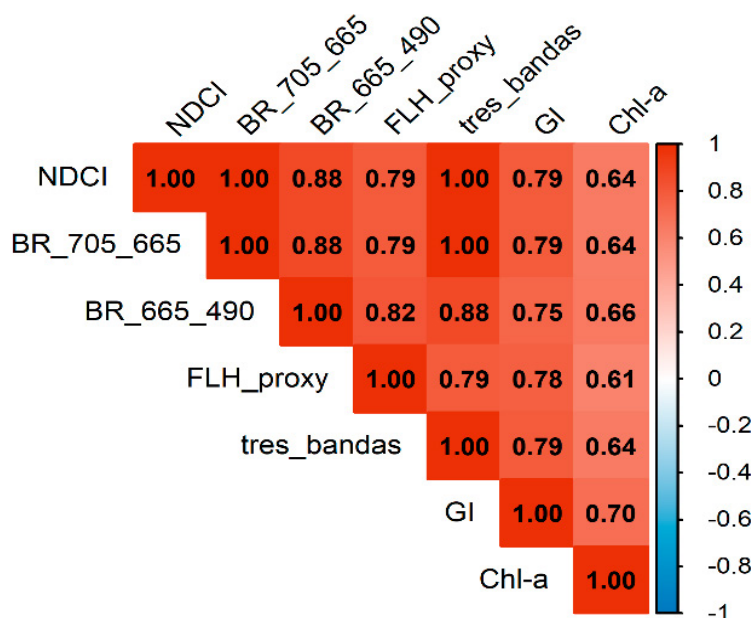


Figura 9.- Matriz de correlación Spearman entre los 6 índices bio-ópticos con la Chl-*a*

Figure 9. Spearman correlation matrix between the six bio-optical indices and Chl-*a*

Según MISHRA y MISHRA (2012) los índices de dos bandas basados en la banda del rojo y el NIR están altamente correlacionados con la clorofila-a, pero debido a la influencia significativa del TSM y el CDOM en aguas con mayor turbidez, estos índices solo se pueden aplicar a aguas relativamente claras. El aporte de sedimentos que recibe la bahía de Sechura durante gran parte del año hace que el agua esté moderadamente turbia, lo que permite que el índice verde sea eficaz en esta región, coincidiendo con los algoritmos OC3, OC5 y OC6 (razón azul/verde) descritos por TRAN *et al.* (2023) quienes obtuvieron un $R^2 = 0,57$ y $0,61$ para OWT de tipo 1 y 3, respectivamente.

CESAR *et al.* (2023) demostraron que el rendimiento de los algoritmos del color del océano (OC) para la estimación de la clorofila-a fue ligeramente mejor al utilizar el algoritmo OC3 de tres bandas, seleccionando la mejor relación de bandas con menor influencia de la absorción ($R_{rs\ 490/555}$) del CDM (CDOM + detritos). Por otro lado, el $GI_{555/490}$ es el inverso matemático del algoritmo OC2, que la NASA adoptó operativamente para SeaWiFS (O'REILLY & WERDELL, 2019) y que reporta el mayor R^2 entre índices de dos bandas a escala global, lo que indica que su uso es óptimo en la bahía de Sechura, ya que ambos capturan el mismo contraste espectral azul-verde con la misma fuerza de señal, tal y como se observa en la Figura 10b.

MISHRA and MISHRA (2012) noted that two-band indices employing red and NIR wavelengths are strongly correlated with chlorophylla. Nevertheless, the substantial influence of SST and CDOM in more turbid waters restricts the applicability of such indices to relatively clear environments. Sechura Bay receives sediment inputs throughout most of the year, creating moderately turbid conditions that favor the green index over red/NIR alternatives. This outcome aligns with the blue/green ratio algorithms OC3, OC5, and OC6 reported by TRAN *et al.* (2023), who achieved R^2 values of 0.57 and 0.61 for OWT types 1 and 3, respectively.

CESAR *et al.* (2023) showed that ocean color algorithms for Chl-*a* estimation performed slightly better when using the threeband OC3 algorithm, specifically by selecting the band ratio least affected by CDM (CDOM + detritus) absorption ($R_{rs\ 490/555}$). Conversely, the $GI_{555/490}$ represents the mathematical inverse of the OC2 algorithm, which NASA has used operationally for SeaWiFS (O'REILLY & WERDELL, 2019) and which yields the highest R^2 among two-band indices globally. This supports the optimal use of the green index in Sechura Bay, as both indices capture the same blue-green spectral contrast with comparable signal strength—consistent with the pattern shown in Figure 10b.

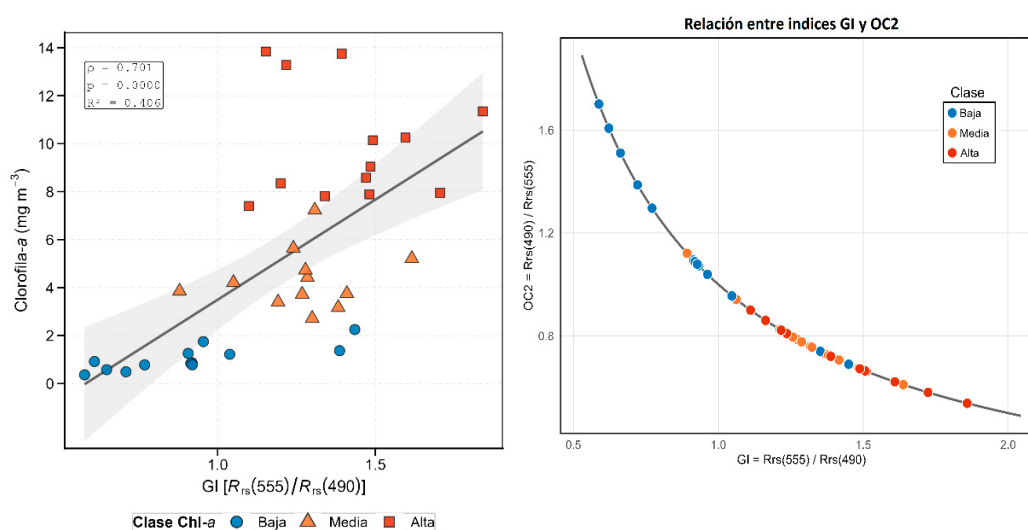


Figura 10.- a) Scatterplot del índice GI vs Chl-a, que muestra la relación entre el índice GI ($R_{rs\ 555/490}$) y la concentración de Chl-a. b) Relación entre los índices GI y OC2

Figure 10. a) Scatterplot illustrating the relationship between the GI ($R_{rs\ 555/490}$) index and Chl-*a* concentration. b) Correlation between the GI index and the OC2 index

3.5 Modelos de clasificación

El modelo LDA es el mejor modelo (Precisión = 63,2 %) superando a los otros modelos en rendimiento global. Su valor de Kappa ($\kappa = 0,446$) se encuentra en el rango “Moderado” entre 0,41–0,60 que, según LANDIS y KOCH (1977), es el umbral aceptable para investigaciones en teledetección costera. Esto es de esperar en variables correlacionadas, ya que se tienen pocos parámetros que estimar y la varianza en la estimación es menor. El LDA alcanza la mayor precisión global (63,2 %) y muestra el mejor rendimiento equilibrado entre las tres clases, con una sensibilidad del 84,6 % (baja), 41,7 % (media) y 61,5 % (alta) en las tres clases, lo que justifica su selección como modelo recomendado. En el caso de los modelos RF y PLS-DA, estos presentan la misma precisión (60,5 %) pero difieren en el perfil de error (Tabla 5).

3.5 Classification Models

Among the three supervised classification approaches evaluated, LDA achieved the highest overall performance, with an accuracy of 63.2% and a Cohen's Kappa coefficient of 0.446. According to the classification scheme proposed by LANDIS and KOCH (1977), this level of agreement falls within the “moderate” range (0.41 -0.60), which is generally considered acceptable for coastal remote-sensing applications. This outcome is expected for correlated variables, since the number of parameters to be estimated is small, resulting in lower estimation variance. LDA attains the highest overall accuracy (63.2%) and demonstrates the most balanced class-wise performance, with sensitivity values of 84.6% for the low class, 41.7% for the moderate class, and 61.5% for the high class. These results justify selecting LDA as the recommended model. In contrast, Random Forest (RF) and PLS-DA yield identical overall accuracies (60.5%) but exhibit distinct error distributions across classes (Table 5).

Tabla 5.- Rendimiento de clasificación de los modelos de aprendizaje automático para las clases de concentración de clorofila-a utilizando índices bio-ópticos derivados de la reflectancia de teledetección
Table 5. Classification performance of machine learning models for chlorophyll-a concentration classes using bio-optical indices derived from remote sensing reflectance

Modelo	Predictor	Precisión (%)	Kappa	Sen. baja (%)	Sen. media (%)	Sen. alta (%)	Esp baja (%)	Esp media (%)	Esp alta (%)	IC 95 %	Valid.
LDA	6 índices	63,2	0,446	84,6	41,7	61,5	88,0	80,8	76,0	33,3 - 81,9	LOOCV
Random Forest	6 índices	60,5	0,407	76,9	41,7	61,5	92,0	73,1	76,0	25,0 - 69,2	LOOCV
PLS-DA	90 bandas Rrs	60,5	0,404	92,3	25,0	61,5	84,0	84,6	72,0	35,7- 81,8	LOOCV

Sen=Sensibilidad, Esp=Especificidad, Valid=validado

El análisis de sensibilidad indica que la clase baja se identifica muy bien con todos los modelos, seguida de la clase alta, que se identifica moderadamente bien. Sin embargo, la clase media no se puede clasificar adecuadamente debido a que su rango de clorofila-a de 2,72 a 7,23 mg/m³ se solapa con los extremos de los percentiles de corte ($p_{33} = 2,35$, $p_{67} = 7,36$ mg/m³), lo que crea una zona de ambigüedad espectral. Además, su CV = 28,5 % indica una mayor heterogeneidad interna, ya que las firmas espectrales de estaciones con clorofila-a entre 3 a 7 mg/m³ no son espectralmente similares (Fig. 11).

Sensitivity analyses showed that all models classified the low-Chl-a class with high reliability, followed by the high-Chl-a class. In contrast, the moderate-Chl-a category proved considerably more difficult to identify. This class encompassed concentrations ranging from 2.72 to 7.23 mg/m³, overlapping substantially with the percentile thresholds used to define class boundaries ($p_{33} = 2.35$, $p_{67} = 7.36$ mg/m³). Consequently, it represents a spectral transition zone characterized by considerable ambiguity. Furthermore, its relatively high coefficient of variation (CV = 28.5 %) indicates greater internal heterogeneity, as stations with Chl-a concentrations between approximately 3 and 7 mg/m³ did not exhibit spectrally consistent signatures (Fig. 11).

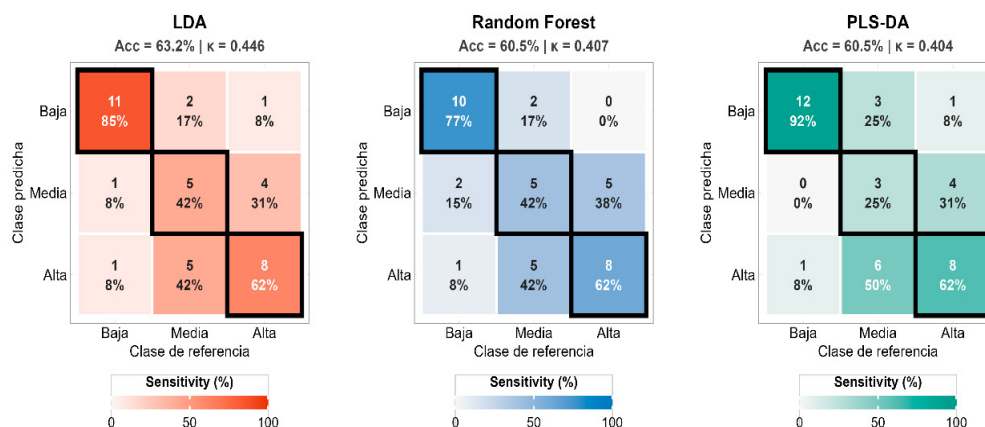


Figura 11.- Matrices de confusión del rendimiento de clasificación de los tres modelos
Figure 11. Confusion matrices summarizing the classification performance achieved by each of the three models

Todos los modelos muestran una alta especificidad, entre el 69 y el 92 %, especialmente para la clase baja (entre 84 y 92 %). Esto significa que, cuando un modelo predice “clase baja”, es poco probable clasificar erróneamente una estación de Chl-*a* de clase alta como baja, por lo que es adecuado para programas de monitoreo ambiental como la identificación de floraciones algales.

3.6 Evaluación de los modelos

La evaluación de los modelos de clasificación mediante LOOCV muestra que el LDA alcanzó la mayor precisión global (63,2 %, $\kappa = 0,446$), seguido del Random Forest y el PLS-DA (ambos con un 60,5 %, $\kappa \approx 0,40$). Todos los modelos superaron significativamente la tasa de información nula del 34,2 % ($p < 0,01$). En todos los modelos, la sensibilidad de la clase media fue sistemáticamente la más baja (25,0 - 41,7 %), lo que refleja la superposición espectral en el rango de transición de la clorofila-*a* (2,72 - 7,23 mg/m³), debido probablemente a la ausencia de características espectrales marcadas, a diferencia de las clases extremas, donde la señal de Chl-*a* compete con la absorción de la materia orgánica disuelta y los sedimentos en suspensión, típicos de aguas costeras Caso II.

El PLS-DA alcanzó la mayor sensibilidad para la clase baja (92,3 %), pero a costa de una reducción considerable de la detección de la clase media (25,0 %). El LDA presentó un rendimiento más equilibrado en las tres clases.

All models exhibited high specificity, ranging from 69 % to 92 %, particularly for the low-Chl-*a* class (84–92 %). This finding indicates a low probability of incorrectly assigning highly productive waters to the low-productivity category, an important characteristic for environmental monitoring programs focused on detecting ecological anomalies and algal bloom events.

3.6 Model Evaluation

The LOOCV results confirmed the robustness of the classification framework. LDA achieved the highest overall accuracy (63.2 %; $\kappa = 0.446$), followed by Random Forest and PLS-DA, both of which reached 60.5 % accuracy with Kappa values close to 0.40. Importantly, all models significantly outperformed the no-information rate of 34.2 % ($p < 0.01$), demonstrating that the classification skill was substantially greater than random assignment. A consistent pattern emerged across all models: the moderate chlorophyll class exhibited the lowest sensitivity (25.0–41.7 %). This result reflects the spectral overlap inherent to transitional chlorophyll concentrations (2.72–7.23 mg/m³), where the optical influence of phytoplankton is neither sufficiently weak nor sufficiently strong to dominate the reflectance signal. In this range, the contribution of chlorophyll competes with absorption and scattering processes associated with CDOM and suspended particulate matter, both of which are characteristic features of Case II coastal waters.

PLS-DA achieved the highest sensitivity for the low-Chl-*a* class (92.3 %), although this improvement occurred at the expense of markedly poorer performance for the intermediate class. In con-

Según los estudios de clasificación del estado trófico de los embalses brasileños, realizados mediante algoritmos de aprendizaje automático (ANN, RF y SVM) con datos $R_{rs}(\lambda)$ y clorofila-*a* *in situ*, llevados a cabo por WATANABE *et al.* (2020), se concluye que los niveles extremos de productividad primaria tienden a ser mejor clasificados. Esta característica resulta similar al patrón observado en Sechura, donde las clases extremas baja y alta mostraron una clasificación por encima de la media, que se situó en la zona de solapamiento.

Finalmente, en la Figura 12 se observa que las tres clases corresponden a firmas espectrales diferenciadas en el espectro visible $R_{rs}(\lambda)$, donde las líneas delgadas son los espectros medios de estaciones individuales y las líneas gruesas representan la mediana de cada clase. Las líneas verticales discontinuas indican las longitudes de onda bio-ópticas clave (443, 490, 555, 665, 705 nm). Las clases se definen por los percentiles 33 y 67: clase baja < 2,35 mg/m³ (color azul), clase media 2,35-7,36 mg/m³ (color naranja) y clase alta > 7,36 mg/m³ (color rojo).

La clase baja se caracteriza por la absorción de agua y CDOM, con una señal de Chl-*a* débil y una reflectancia máxima en la región de la banda azul-verde. La clase media representa una clase de transición, en la que se observa un incremento de la reflectancia en la banda roja del espectro. En la clase alta, la reflectancia está dominada por la alta biomasa algal; las estaciones con concentraciones de Chl-*a* > 10 mg/m³ presentan un pico pronunciado en los 555 nm con $R_{rs}(\lambda)$ de hasta $1,5 \times 10^{-2}$.

trast, LDA maintained a more balanced distribution of classification errors across all categories.

These findings closely resemble those reported by WATANABE *et al.* (2020), who applied machine-learning algorithms (ANN, RF, and SVM), with $R_{rs}(\lambda)$ data, to classify trophic conditions in Brazilian reservoirs using hyperspectral reflectance and *in situ* chlorophyll observations. Their results showed that extreme productivity states are generally easier to classify than intermediate trophic conditions. A comparable pattern was observed in Sechura Bay, where the low- and high-Chl-*a* classes exhibited substantially higher classification success than the transitional intermediate class.

The spectral basis for this behavior is illustrated in Fig. 12. The three classes are associated with clearly differentiated spectral signatures in the visible $R_{rs}(\lambda)$ domain. Thin lines correspond to the mean spectra of individual stations, while thick lines represent the class median. Vertical dashed lines mark key bio-optical wavelengths (443, 490, 555, 665, and 705 nm). Class boundaries are based on the 33rd and 67th percentiles: low class < 2.35 mg/m³ (blue), moderate class between 2.35 and 7.36 mg/m³ (orange), and high class > 7.36 mg/m³ (red).

The low class is dominated by absorption from water and CDOM, displaying a weak chlorophyll *a* signal and peak reflectance in the bluegreen band. The moderate class acts as a transitional category, characterized by increasing reflectance in the red portion of the spectrum. In the high class, reflectance is driven by elevated algal biomass; stations with Chl-*a* concentrations exceeding 10 mg/m³ show a marked peak at 555 nm, where $R_{rs}(\lambda)$ attains values as high as 1.5×10^{-2} .

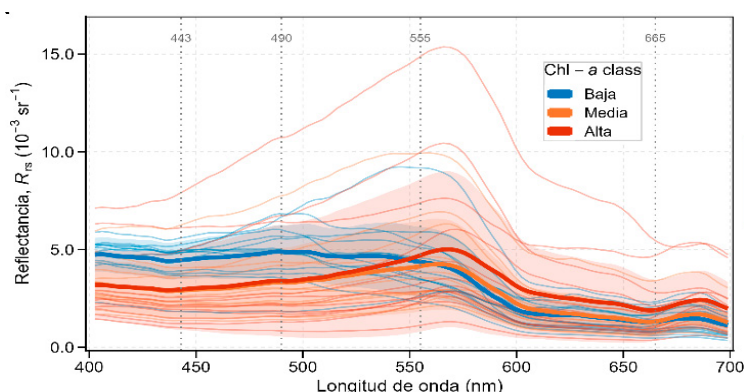


Figura 12.- Firmas de reflectancia de teledetección $R_{rs}(\lambda)$ por clase de Chl-*a*
Figure 12. Remote sensing reflectance spectra $R_{rs}(\lambda)$ stratified by chlorophyll-*a* concentration class

4. DISCUSIÓN

La precisión moderada obtenida en la clasificación (60-63 %) concuerda con los estudios realizados en aguas costeras ópticamente complejos mediante radiometría in situ con tamaños de muestra comparables (SHI *et al.*, 2013; BINDING *et al.*, 2013). La dificultad para clasificar la clase media de la clorofila-*a* observada en los cuatro modelos sugiere que este rango de concentración representa un régimen óptico de transición en la bahía, donde la firma espectral no puede atribuirse de manera inequívoca únicamente a la biomasa de fitoplancton.

Los resultados del modelo LDA ($\kappa = 0,446$) concuerdan con los estudios realizados en aguas costeras ópticamente complejas, en las que el CDOM y la materia inorgánica en suspensión reducen la sensibilidad de los índices espectrales específicos de la clorofila-*a*. La incapacidad persistente para clasificar las estaciones de la clase media en todos los algoritmos sugiere una ambigüedad óptica fundamental a concentraciones intermedias, más que una limitación metodológica. Se recomienda además que, estudios futuros incorporen mediciones simultáneas de la absorción del CDOM y de los sólidos suspendidos totales, para mejorar la separación de las clases de transición.

5. CONCLUSIONES

El índice GI demostró tener la asociación más fuerte con la concentración de clorofila-*a* (Chl-*a*) de todos los índices bio-ópticos evaluados, superando a los índices de banda rojo que se recomiendan tradicionalmente para aguas costeras turbias. Este hecho apunta a que el contraste espectral verde/azul, es la señal bio-óptica dominante en la bahía de Sechura; probablemente debido a la influencia óptica de los aportes terrígenos y la materia orgánica disuelta coloreada (CDOM), que atenúan la señal de borde rojo en 705 nm, característica de los sistemas costeros del sistema de la corriente de Humboldt.

El análisis discriminante lineal (LDA) utilizando seis índices bio-ópticos, alcanzó la ma-

4. DISCUSSION

The moderate classification accuracies obtained in this study (60–63 %) are comparable to those reported for optically complex coastal waters using in situ hyperspectral radiometry and datasets of similar size (SHI *et al.*, 2013; BINDING *et al.*, 2013). The consistent difficulty across all four models in correctly classifying the medium chlorophylla class indicates that this concentration range corresponds to an optical transition zone within the bay, where the observed spectral signature cannot be unequivocally assigned to phytoplankton biomass alone.

The performance of the LDA model ($\kappa = 0.446$) is comparable to results obtained in other Case II coastal waters, where the optical influence of CDOM and suspended inorganic particles reduces the sensitivity of chlorophyll-specific spectral indices. The consistently poor classification of the moderate Chl-*a* class, regardless of algorithm complexity or predictor selection, indicates that the limitation is primarily driven by intrinsic optical ambiguity rather than methodological shortcomings. This finding suggests that intermediate productivity conditions are characterized by overlapping spectral responses arising from the combined influence of phytoplankton, CDOM, and suspended sediments.

5. CONCLUSIONS

Among the bio-optical indices evaluated, the Green Index (GI) exhibited the strongest relationship with chlorophyll-*a* concentration, outperforming the red-near-infrared indices traditionally recommended for turbid coastal waters. This result indicates that the blue-green spectral contrast constitutes the dominant bio-optical signal in Sechura Bay. The enhanced performance of GI is likely associated with the optical influence of terrigenous inputs and colored dissolved organic matter, which attenuate the red-edge reflectance signal near 705 nm that is commonly observed in productive coastal ecosystems of the Humboldt Current System.

Linear Discriminant Analysis (LDA), using six bio-optical indices derived from hyperspectral remote-sensing reflectance, achieved the highest classification accuracy under leave-one-out cross-

yor exactitud de clasificación (LOOCV), superando al Random Forest, y al PLS-DA con 90 bandas espectrales. El mejor rendimiento del LDA frente a algoritmos más complejos demuestra que la relación lineal entre los índices bio-ópticos y las clases de concentración de clorofila-a es suficiente para la discriminación en este conjunto de datos y que aumentar la complejidad del modelo no mejora la clasificación con el número reducido de datos disponible.

Los cuatro modelos evaluados mostraron de manera consistente la menor sensibilidad para la clase media de Chl-a, independientemente del algoritmo o del número de predictores empleados. Esto indica que, la dificultad para clasificar concentraciones intermedias no es una limitación metodológica, sino que refleja una ambigüedad óptica intrínseca en las aguas de transición, donde la influencia simultánea del fitoplancton, el CDOM y los sedimentos en suspensión, generan firmas espectrales superpuestas que no pueden resolverse únicamente con índices basados en la reflectancia.

Las mediciones hiperespectrales de reflectancia de teledetección $R_{rs}(\lambda)$ obtenidas con el radiómetro TriOS Ramses en aguas costeras ópticamente complejas, como las de la bahía de Sechura, permitieron discriminar clases de concentración de clorofila-a. Este resultado establece un marco bio-óptico cuantitativo aplicable a futuras campañas de validación satelital y proporciona una base metodológica para integrar la radiometría de campo y la información satelital en el desarrollo de programas de observación de la biomasa fitoplanctónica a lo largo de la costa peruana.

validation (LOOCV), outperforming both Random Forest and PLS-DA models despite their greater complexity. The superior performance of LDA demonstrates that linear relationships between bio-optical indices and chlorophyll-*a* classes are sufficient to capture the dominant patterns of optical variability within the available dataset. These findings further indicate that increasing model complexity does not necessarily improve classification performance when sample size is limited and predictor variables are highly correlated.

A consistent outcome across all evaluated models was the reduced sensitivity associated with the moderate Chl-*a* class. Because this pattern persisted regardless of the classification algorithm or predictor set employed, the difficulty in identifying intermediate concentrations should not be interpreted as a methodological limitation. Instead, it reflects an intrinsic optical characteristic of transitional waters, where the simultaneous influence of phytoplankton biomass, CDOM, and suspended particulate matter generates overlapping spectral signatures that cannot be fully resolved using reflectance-based indices alone.

The hyperspectral remote-sensing reflectance measurements, $R_{rs}(\lambda)$, acquired with the TriOS Ramses radiometers successfully discriminated chlorophyll-*a* concentration classes in the optically complex coastal waters of Sechura Bay. These results establish a quantitative bio-optical framework for future satellite-validation activities and provide a methodological foundation for integrating field radiometry and satellite observations into long-term phytoplankton biomass monitoring programs along the Peruvian coast.

6. REFERENCIAS

- ADE, C., HESTIR, E. L., AVOURIS, D. M., BURMISTROVA, J., NICKLES, C., LOPEZ, A. M., LOPEZ BARRETO, B., VELLANOWETH, J., SMALLDON, R. & LEE, C. M. (2023). *SHIFT: Ramses Trios Radiometer Above Water Measurements, Santa Barbara Sea, CA* (Version 1). ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/2234>
- BINDING, C. E., GREENBERG, T. A. & BUKATA, R. P. (2013). The MERIS Maximum Chlorophyll Index; its merits and limitations for inland water algal bloom monitoring. *Journal of Great Lakes Research*, 39, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2013.04.005>
- BREIMAN, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- CARLSON, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361–369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- CESAR, G. M., RUDORFF, N. M., OLIVEIRA, A. L., VALERIO, A. M., CHUQUI, M. G., POMPEU, M., GAETA, S. A., FROUIN, S. A. & KAMPEL, M. (2023). Bio-optical properties of South Brazil Bight coastal waters and implications for satellite chlorophyll-*a* concentration retrieval.

- International Journal of Remote Sensing*, 44(7), 2428–2457. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2201385>
- DALL'OLMO, G. & GITELSON, A. A. (2005). Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. experimental results. *Applied Optics*, 44(3), 412–422. <https://doi.org/10.1364/AO.44.000412>
- DA SILVA, E. F., NOVO, E. M., LOBO, F. L., BARBOSA, C. C., NOERNBERG, M., ROTTA, L. H., CAIRO, C., MACIEL, D. & JÚNIOR, R. (2021). Optical water types found in Brazilian waters. *Limnology*, 22, 57–68. <https://doi.org/10.1007/s10201-020-00633-z>
- ESPINOZA VILLAR, R., MARTINEZ, J.-M., LE TEXIER, M., GUYOT, J.-L., FRAIZY, P., MENESES, P. R. & DE OLIVEIRA, E. (2013). A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.006>
- FISHER, R. A. (1936). The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics*, 7(2), 179–188. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x>
- GILSON, A. A., GITELSON, A. A., ZHOU, J., GURLIN, D., MOSES, W., IOANNOU, I. & AHMED, S. A. (2010). Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands. *Optics Express*, 18(23), 24109–24125. <https://doi.org/10.1364/OE.18.024109>
- GITELSON, A. A., GURLIN, D., MOSES, W. J. & BARROW, T. (2009). A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters. *Environmental Research Letters*, 4, 045003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045003>
- HUOT, Y., BROWN, C. A. & CULLEN, J. J. (2005). New algorithms for MODIS sun-induced chlorophyll fluorescence and a comparison with present data products. *Limnology and Oceanography: Methods*, 3, 108–130. <https://doi.org/10.4319/lom.2005.3.108>
- KNAP, A., MICHAELS, A., CLOSE, A., DUCKLOW, H. & DICKSON, A. (Eds.). (1996). *Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements* (JGOFS Report N° 19). Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS). <https://epic.awi.de/id/eprint/17559/1/Kna1996a.pdf>
- LANDIS, J. R. & KOCH, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- MISHRA, S. & MISHRA, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
- MOBLEY, C. D. (1999). Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, 38(36), 7442–7455. <https://doi.org/10.1364/AO.38.007442>
- MORÓN, O., VELAZCO, F. & BELTRÁN L. (2013). Características hidrográficas y sedimentológicas de la bahía de Sechura. *Inf Inst Mar Perú*, 40(3–4), 150–159. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/2238>
- MUELLER, J. L., MOREL, A., FROUIN, R., DAVIS, C., ARNONE, R., CARDER, K., LEE, Z. P., STEWARD, R. G., HOOKER, S., MOBLEY, C. D., MCLEAN, S., HOLBEN, B., MILLER, M., PIETRAS, C., KNOBELSPIESSE, K. D., FARGION, G. S., PORTER, J. & VOSS, K. (2003). *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III: Radiometric Measurements and Data Analysis Methods* (NASA Technical Memorandum NASA/TM-2003-211621/Rev4-Vol.III). National Aeronautical and Space administration; Goddard Space Flight Center. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-62>
- O'REILLY, J. E., MARITORENA, S., MITCHELL, B. G., SIEGEL, D. A., CARDER, K. L., GARVER, S. A., KHARU, M. & MCCLAIN, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(C11), 24937–24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
- O'REILLY, J. E. & WERDELL, P. J. (2019). Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment*, 229, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>
- SCHALLES, J. F. (2006). Optical remote sensing techniques to estimate phytoplankton chlorophyll-a concentrations in coastal waters with varying suspended matter and CDOM concentrations. En L. L. Richardson & E. F. LeDrew (Eds.), *Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes. Remote sensing and digital image processing* (Cap. 3, pp.27–79). https://doi.org/10.1007/1-4020-3968-9_3
- SHI, K., LI, Y., LI, L., LU, H., SONG, K., LIU, Z., XU, Y. & LI, Z. (2013). Remote chlorophyll-a estimates for inland waters based on a cluster-based classification. *Science of the Total Environment*, 444, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.058>
- TRAN, M. D., VANTREPOTTE, V., LOISEL, H., OLIVEIRA, E. N., TRAN, K. T., JORGE, D., MÉRIAUX, X. & PARANHOS, R. (2023). Band ratios combination for estimating chlorophyll-a from Sentinel-2 and Sentinel-3 in coastal waters. *Remote Sensing*, 15, 1653. <https://doi.org/10.3390/rs15061653>
- VOLLENWEIDER, R. A. (1992). Coastal marine eutrophication: principles and control. En R. A. Vollenweider, R. Marchetti & R. Viviani (Eds.), *Marine coastal eutrophication. proceedings of an international conference* (pp. 1–20). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89990-3.50011-0>
- VOLLENWEIDER, R. A. & KERÉKES, J. (1982). *Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control* (Report of the Cooperative Programme on Eutrophication). Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD). <https://acortar.link/KnpjNe>
- WATANABE, F. S., MIYOSHI, G. T., RODRIGUES, T. W., BERNARDO, N. M., ROTTA, L. H., ALCÂNTARA, E. & IMAI, N. N. (2020). Inland water's trophic status classification based on machine learning and remote sensing data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100326>

WOLD, S., SJÖSTRÖM, M. & ERIKSSON, L. (2001). PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58, 109–130. [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(01\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00155-1)

Agradecimientos

Un especial agradecimiento al co-director de KOPELAR-IMARPE, PhD. Han-Jun Woo por su apoyo en la financiación del proyecto piloto “Estudio de las propiedades bio-ópticas del agua y su relación con la actividad pesquera-acuícola en la bahía de Sechura a través de sensores remotos”. Asimismo, agradecer al ingeniero Manuel Guzmán Roca por el análisis de las muestras de sólidos suspendidos totales.

Rol de los autores

Carlos Paulino: conceptualización, investigación, redacción-borrador original, metodología, análisis formal, validación, administración del proyecto. **German Velaochaga:** redacción-borrador original, análisis formal, investigación. **Marceliano Segura:** metodología, redacción-revisión y edición, investigación. **Joo-Hyung Ryu:** investigación, metodología, redacción-revisión y edición, obtención de financiación. **Jun-Ho Lee:** conceptualización, investigación, redacción-revisión y edición, análisis formal

y obtención de financiación. **Jesús Ledesma:** redacción-revisión y edición, investigación.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflictos de intereses financieros ni personales que puedan influir en los resultados de esta investigación.

Declaración de uso de Inteligencia Artificial

Durante la preparación de esta investigación, se utilizó Deep L para verificar la gramática y la ortografía de la redacción. Después de utilizar esta herramienta, como autores editamos, revisamos y aprobamos el resultado final; asumiendo la total responsabilidad por el contenido de la publicación.

Fuentes de financiamiento

Esta investigación recibió subvención del *Korea Institute of Ocean Science and Technology* (KIOST) para llevar a cabo tres operaciones en el mar como parte del proyecto piloto “Estudio de las propiedades bio-ópticas del agua y su relación con la actividad pesquera-acuícola en la bahía de Sechura a través de sensores remotos”, en el marco del convenio entre el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y el Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST).