



ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA CLOROFILA-A DEL SENSOR MODIS-AQUA CON DATOS *in situ* FRENTE A LA COSTA PERUANA DURANTE EL VERANO 2018

ASSESS CHLOROPHYLL-A LEVELS ALONG THE PERUVIAN COAST DURING THE SUMMER OF 2018: A COMPARATIVE STUDY BETWEEN MODIS-AQUA SATELLITE DATA AND *in situ* MEASUREMENTS

Luis Escudero^{1,*}

Jesús Ledesma²

Han Xu¹

Daniel Grados¹

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

² Instituto del Mar del Perú, Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático, Callao, Perú.

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

Recibido: 17-08-2022, Aceptado: 15-04-2024, Publicado: 22-05-2024

RESUMEN

Se registró la clorofila-*a* *in situ* superficial (0-0,5 m) por la técnica fluorométrica durante el crucero 2018-0204 a lo largo de la costa peruana y, se estimó el mismo parámetro a través del modelo OC3M usando imágenes de nivel 0 del sensor MODIS, del satélite Aqua de 250 m de resolución espacial, con el programa SeaDAS 7.4. Al comparar ambas mediciones en 72 estaciones efectuadas durante el crucero, se obtuvo R^2 de 0,66; en las sub-áreas Norte y Sur se detectó mayor correlación (R^2 de 0,77 y 0,76) mientras que en el Centro fue 0,42 debido a la alta variabilidad temporal de la distribución de clorofila-*a* y la nubosidad. El Error Cuadrático Medio (RMSE) de los datos del MODIS fue 35%, evidenciándose alta confiabilidad de esos datos, y los valores del BIAS (sesgo) indican que existe ligera subestimación por el sensor MODIS en las sub-áreas Norte y Centro, y sobreestimación en el área Sur. El diagrama de dispersión muestra que, al incrementar la concentración del pigmento, el grado de dispersión es mayor entre ambas mediciones. El criterio utilizado en este trabajo para determinar los tipos del agua ha sido comprobado con los resultados estadísticos.

PALABRAS CLAVE: clorofila-*a*, MODIS-Aqua, análisis comparativo, SeaDAS, Perú

ABSTRACT

In this study, we investigated surface chlorophyll-*a* levels using *in situ* fluorometric techniques and the OC3M model applied to MODIS Level 0 imagery from the Aqua satellite with a spatial resolution of 250 m, using SeaDAS 7.4 software. The analysis was conducted during the 2018-0204 research cruise along the Peruvian coast. Comparing the chlorophyll-*a* measurements at 72 stations during the cruise revealed a moderate correlation ($R^2 = 0.66$). The Northern and Southern sub-areas showed higher correlations ($R^2 = 0.77$ and 0.76 , respectively), while the Central area exhibited a lower correlation ($R^2 = 0.42$) due to temporal variability and cloud cover. The RMSE of the MODIS data was 35%, indicating good reliability, although the BIAS values indicate a slight underestimation in the Northern and Central sub-areas and an overestimation in the Southern area. Our scatter plot analysis demonstrated increased dispersion between measurements as pigment concentration rose. Overall, the criteria used in this study for water type classification were validated through statistical analysis.

KEYWORDS: chlorophyll-*a*, MODIS-Aqua, comparative analysis, SeaDAS, Peru

1. INTRODUCCIÓN

Las mediciones de pigmentos similares a la clorofila-*a* con sensores remotos, se iniciaron con el lanzamiento del primer sensor de color del océano, *Coastal Zone Color Scanner* - CZCS, a bordo del satélite Nimbus-7, en octubre 1978, para efectuar las primeras estimaciones de productividad

1. INTRODUCTION

The measurements of chlorophyll-like pigments through remote sensing technology began with the launch of the Coastal Zone Color Scanner (CZCS) aboard the Nimbus-7 satellite in October 1978. This marked the dawn of global-scale assessments of primary productivity, a pioneering

primaria a escala global que llegaron hasta 1986 (ANTOINE *et al.*, 1996). Posteriormente, se han utilizado otros sensores, como el SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*) y en la actualidad el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), que se encuentra a bordo del satélite Aqua, lanzado en mayo 2002, que cuenta con 36 bandas espectrales, cuya longitud de onda abarca desde 0,4 hasta 14,4 micras (BASTIDAS & RODRIGUEZ-RUBIO, 2006).

Los pigmentos de clorofila afectan el color del océano y tienen una firma espectral distintiva, pues absorben, en determinadas longitudes de onda, los colores del espectro electromagnético azul (455-492 nm), rojo (622-780 nm) y verde (492-577 nm). Las observaciones multiespectrales del océano con sensores espaciales permiten la detección de cambios de color del océano y localizan las áreas de mayor concentración de fitoplancton (SOMOZA *et al.*, 2007).

La alta productividad frente a la costa peruana se debe principalmente a la Surgencia costera ocasionada por los vientos Alisios, dando lugar a que aguas frías ricas en nutrientes en la subsuperficie, alcancen la zona eufótica. El máximo de la Surgencia se produce en invierno con el refuerzo de los vientos Alisios (BAKUN & NELSON, 1991). El Sistema de la Corriente de Humboldt del Perú representa menos del 0,1% de la superficie del océano mundial, sin embargo, tiene la mayor producción de recursos por área alcanzando hasta el 10% de la captura mundial (CHAVEZ *et al.*, 2008).

A nivel global, TURPIE *et al.* (2012) realizaron la comparación de clorofila-*a* del sensor VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) con observaciones *in situ*, confirmando que cuando obtenemos valores altos de clorofila-*a in situ*, el sensor VIIRS los subestima y cuando son valores bajos se sobreestiman; mientras que el sensor SeaWiFS subestima los valores de reflectancia de las bandas de longitud de onda central de 412, 443 y 670 nm (PINKERTON *et al.*, 2003). Frente a la costa peruana, los estudios comparativos entre el sensor SeaWiFS con datos de clorofila-*a in situ* señalan que los datos de satélite sobreestiman los valores durante el verano y otoño y los subestiman en invierno y primavera (QUISPE *et al.*, 2010).

effort that extended until 1986 (ANTOINE *et al.*, 1996). Subsequently, other sensors, such as the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), and currently the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aboard the Aqua satellite launched in May 2002, have been utilized. The MODIS sensor boasts 36 spectral bands, covering wavelengths ranging from 0.4 to 14.4 microns (BASTIDAS & RODRIGUEZ-RUBIO, 2006).

Chlorophyll pigments influence the color of the ocean and possess a distinctive spectral signature, absorbing specific wavelengths within the blue (455-492 nm), red (622-780 nm), and green (492-577 nm) regions of the electromagnetic spectrum. Multispectral observations of the ocean using satellite sensors facilitate the detection of ocean color changes and pinpoint areas of elevated phytoplankton concentration (SOMOZA *et al.*, 2007).

The high productivity observed off the coast of Peru is primarily attributed to coastal upwelling driven by the trade winds, which transport cold, nutrient-rich waters from the subsurface to the euphotic zone. The peak of the upwelling occurs during winter, reinforced by the prevailing trade winds (BAKUN & NELSON, 1991). Despite comprising less than 0.1% of the world's ocean surface area, the Peru Humboldt Current System yields the highest resource production per unit area, accounting for up to 10% of the global catch (CHAVEZ *et al.*, 2008).

Globally, TURPIE *et al.* (2012) conducted a thorough examination of chlorophyll-*a* levels using the VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) sensor, revealing intriguing patterns when compared to *in situ* observations. They found that VIIRS tends to underestimate high chlorophyll-*a* concentrations while overestimating lower ones. Similarly, analysis by PINKERTON *et al.*, (2003) demonstrated that the SeaWiFS sensor tends to underestimate reflectance values at specific wavelengths. Studies conducted off the coast of Peru, such as those by QUISPE *et al.* (2010), have shed light on the performance of satellite sensors in this region. They revealed that satellite data often overestimate chlorophyll-*a* levels during the warmer seasons and underestimate them during the colder months.

Meanwhile, the *Instituto del Mar del Perú* (IMARPE) has been actively engaged in a comprehensive

El Instituto del Mar del Perú (IMARPE), viene ejecutando en forma continua un programa de investigación de evaluación hidroacústica de los recursos pelágicos desde la década de los 80's, el cual es multidisciplinario con un enfoque ecosistémico. El objetivo de este estudio, fue realizar un análisis comparativo de la clorofila-a satelital del sensor MODIS/Aqua de 250 m de resolución espacial estimada a partir de los datos de nivel 0, con los datos *in situ* durante la ejecución del crucero 2018-0204, por zonas geográficas y por tipo de agua.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Datos *in situ*

Los datos de clorofila-a *in situ* fueron obtenidos durante el crucero 2018-0204 del IMARPE (25 febrero - 3 abril, 2018), de 3°30'S a 18°20'S, hasta 100 mn de la costa (Fig. 1a). Las mediciones fueron analizadas con el método definido por KNAP *et al.* (1994), se empleó un fluorómetro Turner Designs 10AU con kit óptico 10-037R. El procedimiento consiste en retener los pigmentos de agua de mar en microfiltros de fibra de vidrio (Whatman GF/F $\approx 0,75 \mu\text{m}$) tomados de un volumen de 200 mL de agua.

hydroacoustic assessment program for pelagic resources since the 1980s. This program, characterized by its multidisciplinary and ecosystem-oriented approach, has provided valuable insights into marine ecosystems. This study aims to contribute to this body of knowledge by conducting a comparative analysis of chlorophyll-a data obtained from the MODIS/Aqua sensor with a spatial resolution of 250 m, estimated from Level 0 data, against *in situ* data collected during the 2018-0204 cruise, categorized by geographical zones and water types.

2. MATERIALS AND METHODS

In situ data

The *in situ* chlorophyll-a data were collected during the IMARPE cruise 2018-0204, spanning from February 25th to April 3rd, 2018, covering a latitudinal range from 3°30'S to 18°20'S, within 100 nm offshore (Fig. 1a). Analysis followed the protocol outlined by KNAP *et al.* (1994), utilizing a Turner Designs 10AU fluorometer equipped with the optical kit 10-037R. The methodology involved the filtration of seawater pigments through Whatman GF/F glass fiber microfilters ($\approx 0.75 \mu\text{m}$ pore size), extracted from a 200 mL water sample.

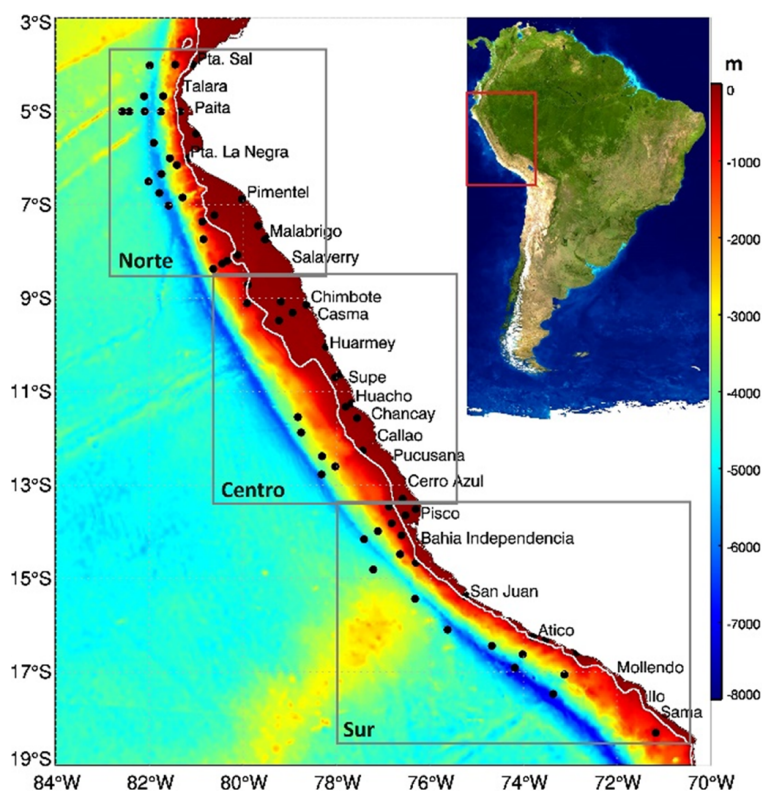


Figura 1.- Área de estudio y ubicación de estaciones por zonas (Norte, Centro y Sur)

Figure 1. Study area and location of stations by zones (North, Central, and South)

Información de satélite

La información de MODIS/Aqua proviene de la base de datos LAADS (*Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System*) distribuidos por el DAAC (*Distributed Active Archive Center*), los cuales se encuentran disponibles en el portal web (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/locate>). Esta información fue procesada utilizando el programa libre SeaDAS (*SeaWiFS Data Analysis System*) versión 7.4, desarrollado por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), desde el Nivel 0 (datos crudos) hasta el Nivel 2 obteniendo la clorofila-*a* (Nivel 1b). En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes MODIS/Aqua.

Datos Nivel 0 (Level 0)

Los datos crudos del sensor MODIS son transmitidos a las estaciones terrestres a través del TDRSS (*Tracking Data Relay Satellite System*) y luego enviados al EDOS (*EOS Data and Operations System*) para su posterior distribución (QIAN, 2016). Los archivos de datos binarios originales de Nivel 0 son valores de DN (*Digital Number*) en formato PDS (*Production Data Set*) tienen una resolución espacial de 250 metros.

Datos L1A

Los datos del Nivel 0 son reformateados y empaquetados en conjunto con formato HDF (*Hierarchical Data Format*) y se denomina como *Level 1A (L1A)*. Cada archivo L1A contiene información integrada por gránulos de 5 minutos y por distintas resoluciones espaciales, además se almacena información

Satellite information

Information from MODIS/Aqua is sourced from the LAADS database (*Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System*), distributed by the DAAC (*Distributed Active Archive Center*). These data are accessible through the web portal (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/locate>). Processing utilized the SeaDAS (*SeaWiFS Data Analysis System*) version 7.4, developed by NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), from Level 0 (raw data) to Level 2, extracting chlorophyll-*a* data (Level 1b). Figure 2 illustrates the processing flowchart of MODIS/Aqua images.

Level 0 Data

Raw MODIS sensor data is transmitted via the TDRSS (*Tracking Data Relay Satellite System*) to ground stations and then processed through the EDOS (*EOS Data and Operations System*) for distribution (QIAN, 2016). Original Level 0 binary data files, in PDS (*Production Data Set*) format, contain Digital Number (DN) values with a spatial resolution of 250 meters.

L1A Data

Level 0 data is reformatted and bundled into HDF (*Hierarchical Data Format*) as Level 1A (*L1A*) data. Each L1A file integrates information from 5-minute granules and various spatial resolutions. Additionally, it includes auxiliary telemetry and navigation information, such as satellite orbit parameters used to create the

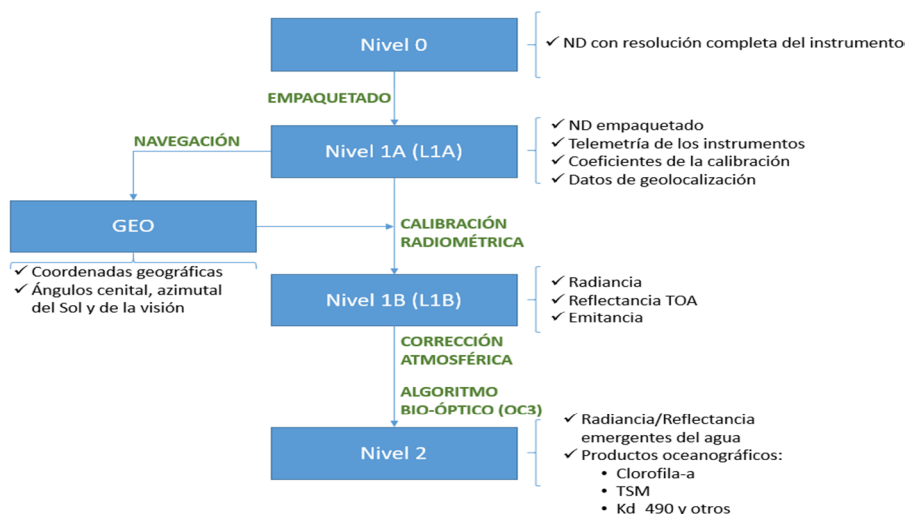


Figura 2.- Diagrama de flujo de procesamiento para obtener la clorofila-*a*

Figure 2. Processing flowchart to obtain chlorophyll-*a*

auxiliar asociada a la telemetría y a la navegación, tales como los parámetros de la órbita del satélite usados para generar la matriz de geolocalización de la imagen (NISHIHAMA *et al.*, 1997) que contienen el valor de las coordenadas, de los ángulos de cenital y azimutal del Sol y de la visión para cada pixel.

Datos L1B

Se realiza la calibración radiométrica durante el vuelo del satélite, en la cual, los datos DN de L1A se convierten a valores de radiancia ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$), reflectancia TOA (*Top Of Atmosphere*) o emitancia¹ de resolución espacial de 250 m a 1 km y almacenados en formato HDF (MODIS CHARACTERIZATION SUPPORT, 2006).

Datos L2

En este proceso, se eliminan los efectos producidos por los aerosoles, el vapor de agua, el ozono y las moléculas de los gases a través del modelo de corrección atmosférica utilizando el Seadas 7.4 generando la reflectancia y radiancia espectral emergente del agua desde 250 m a 1 km de resolución espacial (GORDON & WANG, 1994). Finalmente, se estima la concentración de clorofila-a ($mg \cdot m^{-3}$) a través del algoritmo semi-analítico OC3M (O'REILLY *et al.*, 1998) y expresado por la ecuación (1):

$$Chl_a = 10^{(a+bR+cR^2+dR^3+eR^4)} \tag{1}$$

Donde:

$$R = \log_{10} \left(\frac{Max(Rrs443, Rrs488)}{Rrs547} \right)$$

y los coeficientes (a, b, c, d y e) son determinados de acuerdo del reporte de la NASA (2010):

a	b	c	d	e
0,2424	-2,7423	1,8017	0,0015	-1,2280

R = valor máximo entre las razones de bandas en base de log10.

Rrs = Reflectancia espectral (longitud de onda: 443 nm, 488 nm y 547 nm).

El análisis de la información se realizó considerando periodos cortos de 3 a 4 días (BARBOSA *et al.*, 2009) y la zona geográfica (Tabla 1), generan-

image's geolocation matrix (NISHIHAMA *et al.*, 1997), comprising coordinate values, zenith and azimuth angles of the Sun, and viewing angles for each pixel.

L1B Data

Radiometric calibration is conducted during satellite flight operations, wherein L1A DN data undergo conversion into radiance values ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$), Top Of Atmosphere (TOA) reflectance, or emitance¹. This process enhances the spatial resolution from 250 m to 1 km, with results stored in HDF format (MODIS CHARACTERIZATION SUPPORT, 2006).

L2 Data

During this phase, atmospheric effects such as aerosols, water vapor, ozone, and gas molecules are mitigated using the atmospheric correction model implemented in Seadas 7.4. This process transforms L1A DN data into spectral radiance and reflectance, ranging from 250 m to 1 km resolution (GORDON & WANG, 1994). Subsequently, chlorophyll-a concentration ($mg \cdot m^{-3}$) is estimated using the semi-analytical OC3M algorithm (O'REILLY *et al.*, 1998), as depicted by equation (1):

$$Chl_a = 10^{(a+bR+cR^2+dR^3+eR^4)} \tag{1}$$

Where:

$$R = \log_{10} \left(\frac{Max(Rrs443, Rrs488)}{Rrs547} \right)$$

and the coefficients (a, b, c, d, and e) are determined according to the NASA report (2010):

a	b	c	d	e
0.2424	-2.7423	1.8017	0.0015	-1.2280

R = Maximum value among the band ratios based on log10.

Rrs = Spectral reflectance (wavelength: 443 nm, 488 nm, and 547 nm).

Data analysis involves short-term periods of 3 to 4 days (BARBOSA *et al.*, 2009) within

¹ Emitancia: razón ente la cantidad de calor emitida por una superficie y la cantidad de calor incidente por radiación sobre dicha superficie.

do imágenes por cada sub-área y considerando la coincidencia de hora y la toma de los datos *in situ*, en función de la cobertura nubosa. El análisis de correlación en forma puntual durante los trayectos del crucero, se ha realizado utilizando el módulo “*ship track*” del programa SeaDas.

specified geographical zones (Table 1). Images are generated for each sub-area, considering temporal and *in situ* data collection, contingent on cloud cover. Correlation analysis along cruise paths is facilitated using the “*ship track*” module within the SeaDas software.

Tabla 1.- Imágenes satelitales por sub-áreas y periodos

Table 1. Satellite images by sub-areas and periods

Estaciones Stations	Periodo Period	Imágenes usadas Used images	Coordenadas de los límites de la imagen Coordinates of Image Boundaries			
			Norte (°S) North (°S)	Sur (°S) South (°S)	Este (°W) East (°W)	Oeste (°W) West (°W)
13	25/Feb – 28/Feb	1	3,5	5,5	80,5	83,0
13	02/Mar – 05/Mar	1	5,0	7,2	79,5	83,0
16	06/Mar – 09/Mar	2	6,5	9,0	78,5	81,5
16	10/Mar – 15/Mar	2	8,5	11,5	77,5	80,2
13	15/Mar – 21/Mar	4	11,0	13,0	76,5	79,2
14	22/Mar – 26/Mar	3	12,4	15,7	75,0	77,7
9	26/Mar – 31/Mar	3	14,6	16,5	73,5	76,5
8	31/Mar – 03/Abr	3	16,0	18,5	71,0	74,5

Análisis estadístico

De las 102 estaciones registradas durante el crucero, 10 fueron descartadas debido a la cobertura nubosa y 20 fueron consideradas como datos atípicos en vista que sus valores se encontraron alejados de la media. La correlación de los datos de clorofila-*a* satelital e *in situ*, se efectúa a través del coeficiente de regresión (R²). Previo a este análisis, se calculó el Error Cuadrático Medio RMSE (*Root Mean Squared Error*), el MAE (*Mean Absolute Error*) y BIAS (el sesgo) del logarítmico de los datos satelitales e *in situ* (Ecuas. 2, 3 y 4), ya que la distribución natural de la clorofila-*a* en océano tiene una característica logarítmica (McKINNA *et al.*, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [\log_{10}(Chl_{sat}) - \log_{10}(Chl_{in})]^2}{n}} \times 100 \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum |\log_{10}(Chl_{sat}) - \log_{10}(Chl_{in})|}{n} \times 100 \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{\sum [\log_{10}(Chl_{sat}) - \log_{10}(Chl_{in})]}{n} \times 100 \quad (4)$$

Donde, Chl_{sat} y Chl_{in} son las medidas de clorofila-*a* por el satélite e *in situ*, respectivamente.

Statistical analysis

Out of the 102 stations recorded during the cruise, 10 were excluded due to cloudy conditions, while 20 were flagged as outliers for deviating significantly from the mean. The correlation between satellite and *in situ* chlorophyll-*a* data is assessed using the coefficient of determination (R²). Before this analysis, the Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and BIAS (bias) of the logarithmic-transformed satellite and *in situ* data were computed (Eqs. 2, 3, and 4), as the natural distribution of chlorophyll-*a* in the ocean follows a logarithmic pattern (McKINNA *et al.*, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [\log_{10}(Chl_{sat}) - \log_{10}(Chl_{in})]^2}{n}} \times 100 \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum |\log_{10}(Chl_{sat}) - \log_{10}(Chl_{in})|}{n} \times 100 \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{\sum [\log_{10}(Chl_{sat}) - \log_{10}(Chl_{in})]}{n} \times 100 \quad (4)$$

Where, Chl_{sat} and Chl_{in} denote the chlorophyll-*a* measurements obtained by satellite and *in situ* methods, respectively.

Se comparó la media del conjunto de datos por ambos métodos (medición satelital e *in situ*), por zonas geográficas y por tipo de agua a través de la prueba T y análisis de varianza (ANOVA).

Aguas Caso I y Caso II

Se consideró la clasificación de las aguas oceánicas propuestas por MOREL y PRIEUR (1977), con la finalidad de efectuar un análisis más focalizado, la cual consiste en clasificar en aguas de Caso I y aguas de Caso II, en vista que no tienen las mismas propiedades ópticas y composición, siendo las más complejas las Caso II, las cuales se encuentran en regiones costeras y lagos y están asociadas no solo a concentraciones de clorofilas, sino también a partículas inorgánicas en suspensión y material disuelto de color como sustancias amarillas (gilvin); las aguas Caso I, son la que se encuentran principalmente en mar abierto y a profundidades mayores de 200 m.

El estudio comparativo se realizó en función a tres sub-áreas: Norte (3,5°S-8,5°S), Centro (8,5°S-13,5°S) y Sur (13,5°S-18,5°S); y a los tipos de cuerpo del agua: Caso I (> 200 m de profundidad) y Caso II (< 200 m). Este criterio ya ha sido desarrollado en diversas investigaciones (GREGG & CASEY, 2004; BASTIDAS-SALAMANCA *et al.*, 2006).

3. RESULTADOS

Correlación por casos y sub-áreas

De las 72 estaciones seleccionadas, 38 se ubicaron a profundidades mayores de 200 m (Caso I) y 34 en la plataforma continental (Caso II); por sub-áreas, 31 estaciones se ubicaron en la zona Norte, 20 en la zona Centro y 21 en la zona Sur. Los resultados de los cálculos del RMSE, MAR, BIAS y R² para cada caso y sub-áreas se muestran en la Tabla 2.

The mean of the dataset was compared between the two methods (satellite measurement and *in situ*) across geographical zones and water types using the T-test and analysis of variance (ANOVA).

Water: Case I and Case II

The classification of oceanic waters proposed by MOREL and PRIEUR (1977) was employed to refine our analysis. This classification distinguishes between Case I and Case II waters, recognizing their differing optical properties and compositions. Case II waters, typically found in coastal regions and lakes, are more complex due to their association with not only chlorophyll concentrations but also suspended inorganic particles and dissolved colored materials like yellow substances (gilvin). In contrast, Case I waters are prevalent in open seas and at depths exceeding 200 m.

For our comparative study, we focused on three sub-areas: North (3.5°S-8.5°S), Center (8.5°S-13.5°S), and South (13.5°S-18.5°S), as well as water body types: Case I (> 200 m depth) and Case II (< 200 m). This classification scheme has been widely adopted in previous research endeavors (GREGG & CASEY, 2004; BASTIDAS-SALAMANCA *et al.*, 2006).

3. RESULTS

Correlation by cases and sub-areas

Among the 72 selected stations, 38 were positioned in depths greater than 200 m (Case I), while 34 were situated on the continental shelf (Case II). Across the sub-areas, 31 stations were designated to the Northern zone, 20 to the Central zone, and 21 to the Southern zone. Table 2 displays the calculated RMSE, MAR, BIAS, and R² values for each case and sub-area.

Tabla 2.- Cálculo de RMSE, MAE, BIAS y R² por casos y sub-áreas

Table 2. Estimates of RMSE, MAE, BIAS, and R² by cases and sub-areas

	Área Total Total area	Caso I Case I	Caso II Case II	Norte North	Centro Center	Sur South
# Estaciones	72	38	34	31	20	21
RMSE (%)	28,173	27,022	29,405	21,572	36,317	27,896
MAE (%)	23,407	22,327	24,614	17,782	31,037	24,443
BIAS	0,841	0,788	0,904	0,868	0,658	1,012
R ²	0,664	0,613	0,530	0,772	0,422	0,760

Para toda el área de estudio, se obtuvo un R^2 de 0,66, lo que nos indica que existe alta correlación para ambas variables, con RMSE de 28,17%, el cual no supera el 35% del valor referencial dado por la NASA (LEE, 2006; MOORE, *et al.*, 2009), indicando buena homogeneidad, el MAE fue de 23,41% y el BIAS de 7,54%, estos resultados demuestran que existe una ligera subestimación de clorofila-*a* con el sensor MODIS/Aqua.

Para los cuerpos de agua de los Casos I y II, se obtuvo un R^2 de 0,61 y 0,53, respectivamente, lo que nos muestra que existe mayor correlación en aguas Caso I, debido a que en esta zona la distribución de la clorofila-*a* es más homogénea y contiene menos partículas y sustancias que interfieren con la medición. Por subáreas, las mayores correlaciones se produjeron principalmente en las subáreas Norte y Sur, mientras que en el Centro se obtuvo la menor correlación, de acuerdo con el resultado de RMSE (36,32%). Es importante mencionar que en el Sur se calculó un BIAS de 1,012, lo que nos indica que en esta zona se produce una ligera sobreestimación.

Diagramas de dispersión

En los diagramas de dispersión de los datos de satélite *vs in situ* clasificado por sub-áreas, se observa que los datos de Norte y Sur se distribuyen homogéneamente alrededor de la línea de identidad (diagonal), mientras que los del Centro se encuentran ligeramente más dispersos (Fig. 3a). La distribución por casos muestra que los valores de clorofila-*a* del caso I son más cercanos a la línea de identidad, mientras que los del caso II son ligeramente más dispersos y de mayor valor (Fig. 3b). Así mismo, se calculó una ecuación de regresión lineal entre los datos MODIS *vs in situ*:

$$\log_{10}(Chl_{sat}) = 0.76 \cdot \log_{10}(Chl_{in}) + 0.07 \quad (5)$$

Análisis por trayectos

La Figura 4 muestra el análisis de los datos satelitales durante el trayecto del crucero *vs* los datos *in situ* por subáreas (Norte y Sur). En cada subárea, se ubicaron las estaciones muestreadas (color negro) sobre la información de satélite; el eje horizontal corresponde al número de píxeles entre cada estación, la resolución de cada píxel es de 250 m (0,14 mn) ploteados en color azul y los datos *in situ* están representados por puntos rojos.

Across the entire study area, an R^2 value of 0.66 was attained, signifying a robust correlation between the variables. The RMSE, at 28.17%, falls below the 35% threshold recommended by NASA (LEE, 2006; MOORE, *et al.*, 2009), suggesting good agreement. The MAE and BIAS were calculated at 23.41% and 7.54%, respectively, indicating a slight underestimation of chlorophyll-*a* by the MODIS/Aqua sensor.

For Case I and Case II water bodies, R^2 values of 0.61 and 0.53 were obtained, highlighting stronger correlations in Case I waters, likely due to their more uniform chlorophyll-*a* distribution and lower interference from particles and other substances. Among the sub-areas, the Northern and Southern zones exhibited the highest correlations, while the Central zone showed the lowest correlation, supported by the RMSE result of 36.32%. Notably, a BIAS of 1.012 was observed in the Southern zone, suggesting a slight overestimation in this region.

Scatter plots

In the scatter plots comparing satellite and *in situ* data across sub-areas, it is evident that data points from the North and South are evenly spread around the identity line (diagonal), while those from the Center exhibit slightly more variability (Fig. 3a). When categorized by cases, chlorophyll-*a* values for Case I closely align with the identity line, whereas those for Case II are slightly more dispersed and tend towards higher values (Fig. 3b). Additionally, a linear regression equation was derived to model the relationship between MODIS and *in situ* data:

$$\log_{10}(Chl_{sat}) = 0.76 \cdot \log_{10}(Chl_{in}) + 0.07 \quad (5)$$

Trajectory Analysis

Figure 4 illustrates the comparison between satellite-derived data along the cruise trajectory and corresponding *in situ* measurements for the North and South sub-areas. Each sampled station (depicted in black) is superimposed on satellite imagery, with the horizontal axis indicating the number of pixels between stations. Each pixel represents a resolution of 250 meters (0.14 nm), depicted in blue, while *in situ* data is represented by red points.

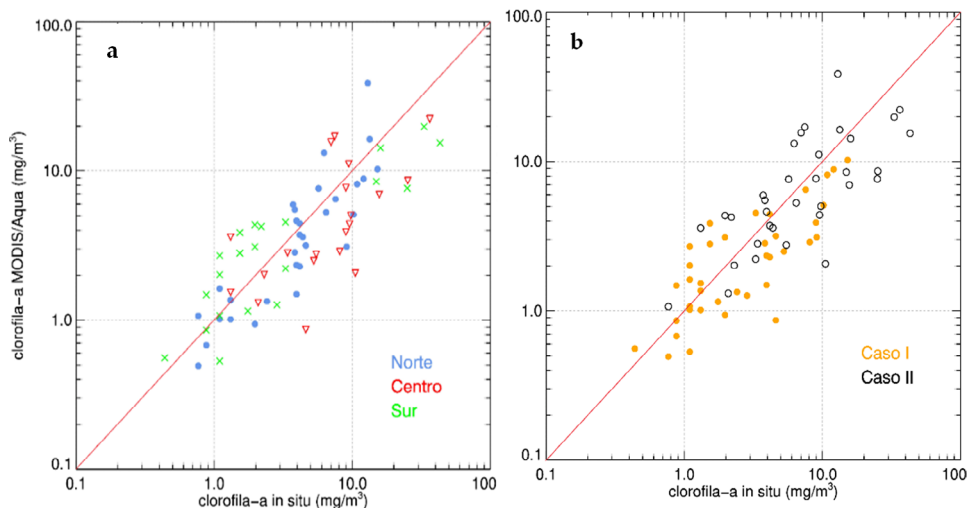


Figura 3.- Diagrama de dispersión de los datos satelitales con los datos *in situ* clasificados por (a) sub-áreas y (b) casos

Figure 3. Scatter plot of satellite data *vs in situ* data classified by (a) sub-areas and (b) cases

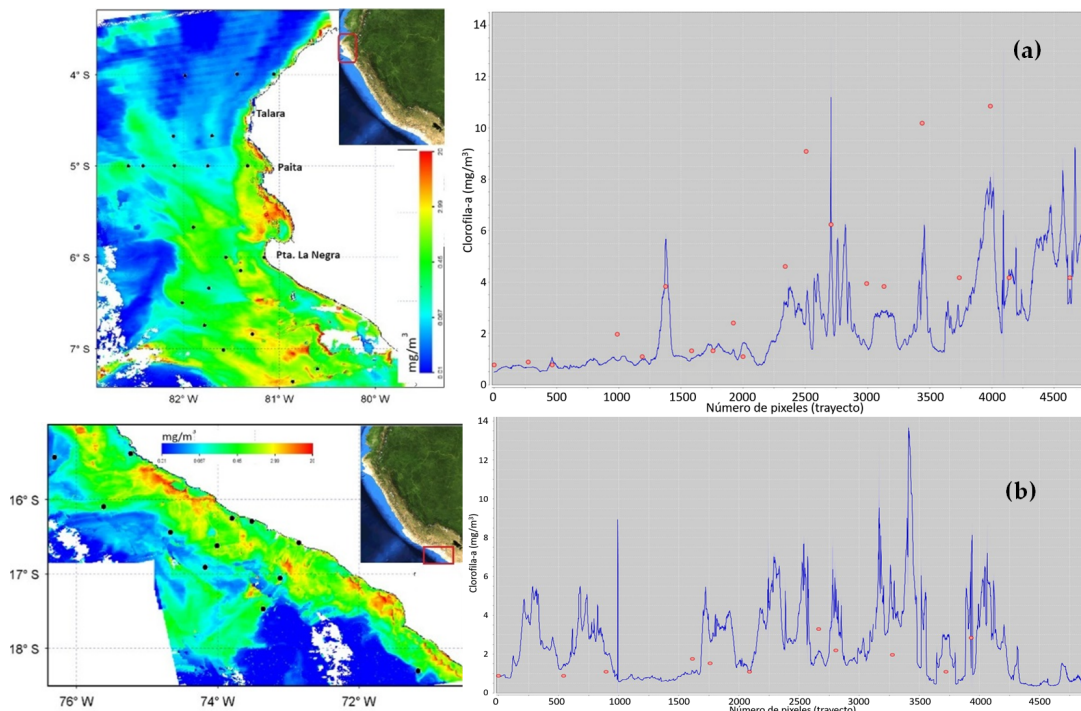


Figura 4.- Datos satelitales de clorofila (línea azul) vs datos *in situ* (puntos rojos) por sub-áreas (a) Norte y (b) Sur

Figure 4. Chlorophyll satellite data (blue line) *vs in situ* data (red dots) by sub-areas (a) North and (b) South

Entre Punta Sal y Pimentel (Fig. 4a), ambas variables presentan similar magnitud, sin embargo, se observó dos comportamientos diferentes, entre Punta Sal y Talara (trayecto de 0 a 2000 píxeles) la distribución de clorofila-*a* es muy homogénea, en el rango hasta 2 mg/m³, donde las mediciones son más similares. De Talara a Pimentel, se observó mayor dispersión entre ambas variables, debido a que en esta zona la distribución de la clorofila tiene mayor dinámica. Similar compor-

Between Punta Sal and Pimentel (Fig. 4a), both datasets exhibit comparable magnitudes. However, distinct patterns emerge: from Punta Sal to Talara (spanning 0 to 2000 pixels), chlorophyll-*a* distribution appears highly uniform, particularly within the range up to 2 mg/m³, where measurements closely align. Conversely, from Talara to Pimentel, greater variability between the datasets is observed, reflecting the dynamic nature of chlorophyll distribution in this region. A similar

tamiento se puede apreciar al Sur (Fig. 4b) de San Juan a Morro Sama, donde, se observa que el sensor MODIS tiene una ligera subestimación sobre los datos *in situ*.

Prueba T y ANOVA

Para el análisis comparativo entre ambas variables, se realizó una prueba T para muestras independientes con intervalo de confianza de 95%, y se obtuvo media de 5,56 y 7,05 mg/m³ para MODIS e *in situ*. Sin embargo, no se puede afirmar que existe diferencia significativa entre ambos valores debido a que el valor de *p* fue 0,126. El mismo análisis se aplicó para los Casos I y II de agua y se obtuvo un valor de *p* = 0,00 lo cual rechaza la hipótesis nula, llegándose a la conclusión de que las medias de los casos de agua son diferentes y que la mayor concentración de clorofila-*a* se encuentra en aguas del Caso II, con media de 9,63 mg/m³ y para el Caso I el valor fue menor (3,33 mg/m³) (Tabla 3).

Se realizó un análisis ANOVA (pruebas *post hoc*) para la comparación de las medias entre las subáreas (Tabla 4), el resultado de la diferencia de las medias fue de -2,23 mg/m³ (Norte-Centro), -0,76 mg/m³ (Norte-Sur) y +1,47 mg/m³ (Centro-Sur). Se puede observar que estadísticamente no existe diferencia de medias entre las subáreas. La mayor diferencia fue entre las subáreas Norte y Centro.

trend is evident in the Southern trajectory (Fig. 4b), from San Juan to Morro Sama, where the MODIS sensor demonstrates a slight underestimation relative to *in situ* measurements.

T-Test and ANOVA

To compare both variables, an independent samples T-test was conducted with a 95% confidence interval. The mean chlorophyll-*a* concentration was found to be 5.56 mg/m³ for MODIS and 7.05 mg/m³ for *in situ* measurements. However, the obtained *p*-value of 0.126 suggests that there is no significant difference between these values. The same analysis was applied to Cases I and II water bodies, yielding a *p*-value of 0.00, which rejects the null hypothesis. This indicates that the mean chlorophyll-*a* concentrations differ between the water cases. Specifically, Case II waters exhibited a higher concentration with a mean of 9.63 mg/m³, while Case I waters had a lower mean concentration of 3.33 mg/m³ (Table 3).

An ANOVA analysis (*post hoc* tests) was conducted to compare the means across sub-areas (Table 4). The results indicate mean differences of -2.23 mg/m³ (North-Center), -0.76 mg/m³ (North-South), and +1.47 mg/m³ (Center-South). Statistically, no significant differences in means were observed among the sub-areas. Notably, the most substantial difference was observed between the North and Center sub-areas.

Tabla 3.- Número de estaciones, media y media de error estándar para las fuentes de medición y tipos de agua

Table 3. Number of stations, mean and mean standard error for measurement sources and types of water

Clorofila- <i>a</i> (mg/m ³) Chlorophyll- <i>a</i> (mg/m ³)		Nro. Estaciones No of stations	Media Mean	Media de error estándar Mean standard error	t	p
Método Method	<i>In situ</i> Satelital Satellite	72	7,05	0,98	1,21	0,13
		72	5,56	0,75	1,21	0,13
Tipos Types	Caso I Case I	76	3,33	0,36	-5,61	0,00
	Caso II Case II	68	9,63	1,12	-5,36	0,00

Tabla 4.- Diferencia de medias, error estándar y *p* valor entre las zonas

Table 4. Difference in means, standard error, and *p*-value between the zones

Zona 1 Zone 1	Zona 2 Zone 2	Diferencia de medias Difference in means	Error estándar Standard error	p
Norte North	Centro Center	-2,23	1,50	0,14
Norte North	Sur South	-0,76	1,48	0,61
Centro Center	Sur South	+1,47	1,64	0,37

4. DISCUSIÓN

Son diversos los factores que intervienen en las mediciones espectrales del sensor al estimar la concentración de clorofila-*a*, entre las principales se consideran la composición de las aguas (aguas Caso I y Caso II) y la influencia de otros factores como la profundidad. En este análisis no se han observado diferencias significativas en los resultados de ambas comparaciones, considerando que las aguas Caso II están influenciadas no solo por las concentraciones de clorofila, sino también por las partículas inorgánicas en suspensión que se encuentran en las descargas de los ríos. También hay contribución de material disuelto colorido (gilvin) (KIRK, 2013)

De acuerdo con la posición geográfica y fecha de toma de mediciones *in situ*, se han utilizado 16 imágenes para abarcar el área de estudio, de tal manera que, los datos satelitales e *in situ* corresponden al mismo día, en el cual, la variación de la concentración de clorofila-*a* es relativamente pequeña (BABIN *et al.*, 2015). Entre las imágenes, nueve son para la subárea Centro (entre 10 y 26 de marzo) con RMSE superior al 35%, ya que, en esa región, la plataforma es más amplia, la dinámica del mar es de alta variabilidad y la nubosidad es mayor al comparar con otras subáreas (Fig. 5); estos factores afectan la calidad de los datos satelitales en el Centro y resultó en una correlación baja con respecto a otras subáreas.

4. DISCUSSION

Several factors influence the spectral measurements of the sensor when estimating chlorophyll-*a* concentration. Among the key considerations are water composition (Case I and Case II waters) and the impact of additional factors such as depth. In our analysis, we found no significant differences in the results of both comparisons. It is important to note that Case II waters are influenced not only by chlorophyll concentrations but also by suspended inorganic particles from river discharges. Additionally, colored dissolved organic matter (gilvin) contributes to the overall spectral profile (KIRK, 2013)

Considering the geographical position and date of *in situ* measurements, 16 images have been used to cover the study area, ensuring that satellite and *in situ* data correspond to the same day when chlorophyll-*a* concentration variation is relatively small (BABIN *et al.*, 2015). Among the images, nine are for the Center sub-area (between March 10th and 26th) with an RMSE exceeding 35%. In this region, the platform is wider, the sea dynamics exhibit high variability, and cloud cover is greater compared to other sub-areas (Fig. 5). These factors affect the quality of satellite data in the Center and result in a lower correlation compared to other sub-areas.

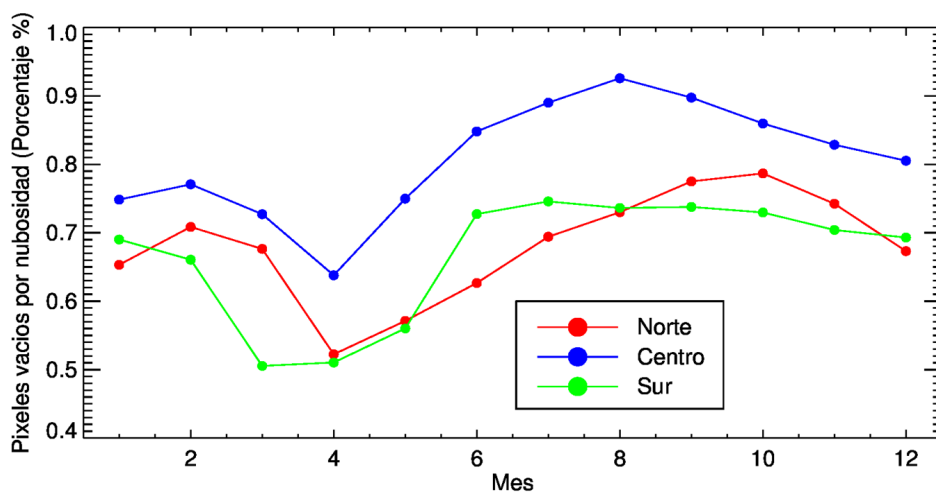


Figura 5.- Promedio mensual de pixeles vacíos en las sub-áreas (hasta 25 mn de la costa) usando los datos de MODIS de 1 km de resolución espacial (2010-2019)

Figure 5. Monthly average of empty pixels in the sub-areas (up to 25 nm offshore) using MODIS data of 1 km spatial resolution (2010-2019)

La concentración de clorofila-*a* fue ligeramente subestimada por el sensor MODIS en el verano 2018. La alta correlación en las subáreas Norte y Sur, indica una buena estimación con el algoritmo OC3M a resolución espacial de 250 m, mientras que, la moderada correlación del Centro impide un posible enmascaramiento para pixeles contaminados por la dispersión de la radiación en la atmósfera (FENG & HU, 2016). Los diagramas de dispersión nos mostraron una leve tendencia a la dispersión cuando incrementa su valor, es decir, la correlación es ligeramente mayor en el mar abierto que en la costa.

5. CONCLUSIONES

Los resultados del indicador estadístico RMSE, (<35%) nos indica que los datos tienen alto grado de confiabilidad. El BIAS calculado (0,84) muestra que, para las subáreas Norte y Centro el sensor MODIS ligeramente sobreestima la concentración de clorofila-*a* con respecto a los datos *in situ*, mientras que en la subárea Sur, sobrestima la clorofila-*a* debido a que el valor de BIAS es ligeramente mayor a 1 (1,01).

En las subáreas Norte y Sur se obtuvieron las mayores correlaciones (R^2 de 0,77 y 0,76, respectivamente), mientras que la menor correlación se encontró en el Centro ($R^2 = 0,42$), debido a que, en esta zona la distribución de la clorofila-*a* presenta mayor dinámica espacial, donde, en zonas costeras, la clorofila-*a* está influenciada por la radiación del Sol y por diversos procesos, como la descarga de los ríos, el viento y las corrientes.

Las aguas fuera de la plataforma continental (Caso I) tienen mayor correlación (R^2 de 0,613), debido a sus propiedades ópticas más estables y a estar alejadas de las regiones costeras (Caso II), además tienen poca influencia del fitoplancton y otras partículas orgánicas e inorgánicas. En general, la correlación $R^2 = 0,664$ se encuentra en el rango de otros trabajos (CAMPBELL & O'REILLY, 2006; QUISPE *et al.*, 2010).

De acuerdo a los diagramas de dispersión, para el caso de agua de tipo II a medida que aumenta la concentración de clorofila, se incrementa la dispersión entre los datos del satélite con los datos *in situ*. Debido a la influencia de material particulado (tripton) y disuelto (gilvin) (KIRK, 2013).

In the summer of 2018, the MODIS sensor exhibited a slight underestimation of chlorophyll-*a* concentration. Despite this, there was a strong correlation observed in the North and South sub-areas, indicating accurate estimation with the OC3M algorithm at a 250 m spatial resolution. However, in the Center sub-area, the correlation was moderate, which may hinder the identification of pixels contaminated by atmospheric radiation scattering (FENG & HU, 2016). Scatter plots illustrated a subtle dispersion trend with increasing values, suggesting a slightly stronger correlation in open sea regions compared to coastal areas.

5. CONCLUSIONS

The RMSE statistical indicator results (<35%) demonstrate a high level of data reliability. The calculated BIAS (0.84) indicates that the MODIS sensor tends to slightly overestimate chlorophyll-*a* concentrations in the North and Center sub-areas compared to *in situ* measurements. Conversely, in the South sub-area, there is an overestimation of chlorophyll-*a*, with a BIAS slightly above 1 (1.01).

Notably, the North and South sub-areas exhibited the highest correlations (R^2 of 0.77 and 0.76, respectively), while the Center sub-area showed the lowest correlation ($R^2 = 0.42$). This discrepancy can be attributed to the dynamic spatial distribution of chlorophyll-*a* in the Center, influenced by various factors such as solar radiation, river discharge, wind, and currents, particularly along coastal zones.

Waters beyond the continental shelf (Case I) demonstrated a stronger correlation (R^2 of 0.613) due to their more consistent optical properties and distance from coastal regions (Case II). These areas experience less influence from phytoplankton and other organic and inorganic particles. Overall, the correlation coefficient of $R^2 = 0.664$ falls within the range observed in other studies (CAMPBELL & O'REILLY, 2006; QUISPE *et al.*, 2010).

Scatter plot analysis revealed that in Case II waters, as chlorophyll concentration increases, there is greater dispersion between satellite and *in situ* data, likely due to the influence of particulate (tripton) and dissolved (gilvin) material (KIRK, 2013).

Los resultados del análisis por trayecto muestran un rango similar entre ambas variables cuando la distribución de clorofila-a es más homogénea y la concentración es inferior a 2 mg/m³. Para la concentración mayor a 2 mg/m³, se observa mayor dispersión entre ambas variables.

Los resultados de la prueba T y ANOVA nos indican que estadísticamente las medias son iguales para ambos métodos de estimación y para las subáreas, la mayor diferencia encontrada fue entre Norte y Centro (-2,23 mg/m³). Y existe diferencia entre los Casos I y II de agua.

Trajectory analysis results indicated a consistent range between both variables when chlorophyll-a distribution was relatively homogeneous and concentrations were below 2 mg/m³. However, for concentrations exceeding 2 mg/m³, greater dispersion between the variables was observed.

The T-test and ANOVA results suggest that statistically, the means do not significantly differ between estimation methods and sub-areas. The most noticeable difference was observed between the North and Center (-2.23 mg/m³), and there was a discernible distinction between Case I and Case II waters.

6. REFERENCIAS

- ANTOINE, D., ANDRÉ, J.-M. & MOREL, A. (1996). Oceanic primary production. 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10(1), 57-69. <https://doi.org/10.1029/95GB02832>
- BABIN, M., ARRIGO, K., BÉLANGER, S. & FORGET, M. H. (Eds.). (2015). *Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas* (Reporte IOCCG n° 16). International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG). <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-107>
- BAKUN, A. & NELSON, C. S. (1991). The seasonal cycle of wind-stress curl in subtropical eastern boundary current regions. *Journal of Physical Oceanography*, 21(12), 1815-1834. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<1815:TSCOWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<1815:TSCOWS>2.0.CO;2)
- BARBOSA, C. C. F., NOVO, E. M. L. M. & MARTINEZ J. M. (2009). Remote sensing of the water properties of the Amazon floodplain lakes: the time delay effects between in-situ and satellite data acquisition on model accuracy. In *Proceedings: 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment: Sustaining the Millennium Development Goals, May 4-9, 2009 Stresa, Italy* (pp. 1-4). International Center for Remote Sensing of Environment.
- BASTIDAS, M. & RODRÍGUEZ-RUBIO, E. (2006). Validación de la concentración de clorofila-a generada por el sensor MODIS-Aqua con datos in situ en el Pacífico colombiano. *Revista Colombiana de Física*, 38(2), 774-777.
- BASTIDAS-SALAMANCA, M. L., RODRÍGUEZ-RUBIO, E. & ORTIZ GALVIS, J. R. (2006). Obtención y validación de clorofila en la cuenca pacífica colombiana a partir de imágenes satelitales. *Boletín Científico CCCP*, (13), 33-40. https://doi.org/10.26640/01213423.13.33_40
- CAMPBELL, J. W. & O'REILLY, J. E. (2006). Metrics for Quantifying the Uncertainty in a Chlorophyll Algorithm: Explicit Equations and Examples using the OC4.v4 Algorithm and NOMAD Data. In *Report from the Ocean Color Bio-optical Algorithm Mini-workshop* (Vol. 4, pp. 1-15). <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/meetings/ocbam/PerformanceMetrics.pdf>
- CHAVEZ, F. P., BERTRAND, A., GUEVARA-CARRASCO, R., SOLER, P. & CSIRKE, J. (2008). The northern Humboldt Current System: brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography* 79(2-4), 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.012>
- FENG, L. & HU, C. (2016). Cloud Adjacency Effects on Top-of-atmosphere Radiance and Ocean Color Data Products: A Statistical Assessment. *Remote Sensing of Environment*, 174, 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.02>
- GORDON, H. R. & WANG, M. (1994). Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A Preliminary Algorithm. *Appl. Opt.*, 33(3), 443-452. <https://doi.org/10.1364/AO.33.000443>
- GREGG, W. W. & CASEY, N. W. (2004). Global and Regional Evaluation of the SeaWiFS Chlorophyll Data Set. *Remote Sensing of Environment*, 93(4), 463-479. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.012>
- KIRK, J. T. O. (2013). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems* (3^o ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168212>
- KNAP, A., MICHAELS, A., CLOSE, A., DUCKLOW, H. & DICKSON, A. (Eds.). (1994). *Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements* (JGOFS Report Nr. 19, Reprint of the IOC Manuals and Guides No. 29, UNESCO 1994). JGOFS Report. <https://epic.awi.de/id/eprint/17559/1/Kna1996a.pdf>
- LEE, Z. P. (Ed.). (2006). *Remote Sensing of Inherent optical properties: Fundamentals, tests of algorithms, and applications* (Reporte IOCCG n° 5). International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG). <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-96>
- MCKINNA, L., CETINIC, I., CHASE, A. & WERDELL, P. (2019). Approach for propagating radiometric data uncertainties through Nasa ocean color algorithms. *Front. Earth Sci.*, 176(7), 1-17. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00176>
- MODIS CHARACTERIZATION SUPPORT TEAM [MCST]. (2006). *MODIS Level 1B Product User's Guide* (Memorando Internon°M1054). NASA/Goddard Space Flight Center. https://mcst.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/file_attachments/M1054.pdf

- MOORE, T. S., CAMPBELL, J. W. & DOWELL, M. D. (2009). A class based approach to characterizing and mapping the uncertainty of the MODIS ocean chlorophyll product. *Remote Sens. Environ.*, 113(11), 2424-2330. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.016>
- MOREL, A. & PRIEUR, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4), 709-722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- NASA. (2010). *Ocean color chlorophyll (OC) v6*. <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/reprocessing/r2009/ocv6/>
- NISHIHAMA, G., WOLFE, R., SOLOMON, D., PATT, F., BLANCHETTE, J., FLEIG, A. & MASOUKA, E. (1997). *MODIS Level 1A Earth Location: Algorithm Theoretical Basis Document Version 3.0*. MODIS Science Data Support Team. https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/atbd/atbd_mod28_v3.pdf
- O'REILLY, J. E., MARITORENA, S., SIEGEL, D., CARDER, K., GARVER, S. A., KAHRU, M. & McCLAIN, C. (1998). Ocean Color Chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(C11), 24937-24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
- PINKERTON, M. H., LAVENDER, S. J. & AITKEN, J. (2003). Validation of SeaWiFS ocean color satellite data using a moored databuoy. *Journal of Geophysical Research*. 108(C5), 1-9. <https://doi.org/10.1029/2002JC001337>
- QIAN, S. E. (Ed.). (2016). *Optical Payloads for Space Missions*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118945179>
- QUISPE, D., CALIENES, R., TAM, J., GRACO, M., LEDESMA, J., FLORES, G., CORREA, D. & QUISPE, C. (2010). Análisis Comparativo entre Clorofila-*a* Satelital e *in situ* en el Ecosistema de Afloramiento Peruano, entre 1998-2007. *Ecología Aplicada* 9(2), 151-159. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v9n2/a10v9n2.pdf>
- SOMOZA, R. D., KAMPPEL, M. & BUSS DE SOUZA, R. (2007). Variabilidad de la concentración de clorofila *a* en las aguas adyacentes a la plataforma cubana y su relación con las pesquerías de langosta (*Panulirus argus*). En *Anais XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007* (pp. 4699-4706). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- TURPIE, K. R., ROBINSON, W. D., FRANZ, B. A., EPLEE, R. E., MEISTER, G., FIREMAN, G. F., PATT, F. S., BARNES, R. S. & McCLAIN, C. R. (2012). Suomi NPP VIIRS Ocean Color Data Product Early Mission Assessment. *Earth Observing Systems XVII*, 8510, 85101H-1 - 85101H-16. <https://doi.org/10.1117/12.931113>