



EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN Y LA TRANSPARENCIA DEL MAR UTILIZANDO IMÁGENES DEL SATÉLITE SENTINEL-2B EN LA BAHÍA EL FERROL, CHIMBOTE, PERÚ

ASSESSMENT OF THE ATTENUATION COEFFICIENT AND SEAWATER TRANSPARENCY USING SENTINEL-2B SATELLITE IMAGERY IN EL FERROL BAY, CHIMBOTE, PERU

Luis Escudero^{1,*}

Han Xu¹

Naldi Herrera¹

Ángel Perea²

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, Laboratorio Costero de Chimbote, Perú.

* Correspondencia. Email: lescudero@imarpe.gob.pe

Recibido: 30-10-2024, Aceptado: 03-11-2025, Publicado: 11-11-2025

RESUMEN

Se estimaron los parámetros del coeficiente de atenuación ($K_{d_{PAR}}$) y la transparencia en la bahía El Ferrol-Chimbote a través de los modelos monocanal y multicanales usando los datos de reflectancia del satélite Sentinel-2B, con el objetivo de evaluar diversos modelos de ajuste para la estimación de la transparencia del mar y del coeficiente de atenuación difusa en la bahía El Ferrol de Chimbote, en base tanto a observaciones *in situ* durante los años 2023 y 2024 como utilizando imágenes del satélite Sentinel-2B. A los datos de mayo – junio del 2024, se les aplicó un filtrado de nubes usando el método de umbral, debido a la nubosidad. Con modelos de ajuste que diversos autores han utilizado para establecer la relación entre la reflectancia satelital y estos dos parámetros, se han evaluado 51 modelos de estimación del $K_{d_{PAR}}$ y 49 modelos de transparencia. Los resultados de la comparación con los datos *in situ* muestran que, el modelo de regresión lineal simple fue más adecuado para la estimación del $K_{d_{PAR}}$ y el modelo potencial lo fue para la transparencia de los años 2023 y 2024. Se ha encontrado que la diferencia de valor de reflectancia entre la longitud de onda de 705 nm y 740 nm fue la relación más adecuada para los modelos de estimación. El resultado para el coeficiente de atenuación difusa $K_{d_{PAR}}$ fue: $K_{d_{PAR}} = 71,167 * (R_{705} - R_{740}) + 0,285$, $R^2 = 0,67$, $RMSE = 19,00$, $MAE = 14,97$ y $BIAS = +1,12$. Para la estimación de la transparencia P_{DS} se obtuvo la ecuación $P_{DS} = 0,122 * (R_{705} - R_{740})^{-0,582}$, $R^2 = 0,67$, $RMSE = 19,56$, $MAE = 15,54$ y $BIAS = 0$.

PALABRAS CLAVE: coeficiente de atenuación, transparencia, disco Secchi, Sentinel-2B

ABSTRACT

The attenuation coefficient ($K_{d_{PAR}}$) and seawater transparency in El Ferrol Bay, Chimbote, were assessed using single-band and multi-band modeling approaches based on Sentinel-2B satellite reflectance data. This study aimed to evaluate and calibrate different empirical models to estimate both the attenuation coefficient and water transparency, integrating *in situ* observations collected in 2023 and 2024 with Sentinel-2B imagery. Due to frequent cloud cover, a cloud-masking threshold filter was applied to the May–June 2024 dataset. Following methodologies proposed in previous optical modeling studies, 51 models for $K_{d_{PAR}}$ and 49 for transparency were tested to determine the best-performing relationships between satellite reflectance and field measurements. Comparative analysis with *in situ* data revealed that a simple linear regression model provided the most accurate estimation for $K_{d_{PAR}}$, while a power-law model yielded the best performance for transparency in both years. The reflectance difference between the 705 nm and 740 nm bands proved to be the most effective predictor variable for both parameters. The optimal equation for the diffuse attenuation coefficient was: $K_{d_{PAR}} = 71,167 * (R_{705} - R_{740}) + 0,285$, $R^2 = 0.67$, $RMSE = 19.00$, $MAE = 14.97$, and $BIAS = +1.12$. For water transparency (P_{DS}), the best-fitting model was: $P_{DS} = 0,122 * (R_{705} - R_{740})^{-0,582}$, with $R^2 = 0.67$, $RMSE = 19.56$, $MAE = 15.54$, and $BIAS = 0$.

KEYWORDS: attenuation coefficient, transparency, Secchi disk, Sentinel-2B

COMO REFERENCIAR ESTE ARTÍCULO (APA 7ED): Escudero, L., Xu, H., Herrera, N. & Perea, Á. (2025). Evaluación del coeficiente de atenuación y la transparencia del mar utilizando imágenes del satélite Sentinel-2B en la bahía El Ferrol, Chimbote, Perú. *Bol Inst Mar Perú*, 40(2), e436. <https://doi.org/10.53554/boletin.v40i2.436>

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua permite determinar su utilidad para diversas aplicaciones como la recreación, el consumo, la pesca, la agricultura y la industria (CHAPELLE *et al.*, 2009). El aumento de las actividades antropogénicas, especialmente en el área industrial, ha producido efectos negativos en las zonas costeras. El monitoreo y la evaluación de la calidad de las aguas superficiales son fundamentales para gestionar y mejorar su calidad. En la actualidad, se utilizan mediciones *in situ* y la recolección de muestras de agua para posteriores análisis de laboratorio y su evaluación (RITCHIE *et al.*, 2003).

Las métricas generales que cuantifican la calidad del agua incluyen: la transparencia medida por un disco Secchi (TYLER, 1968; PREISENDORFER, 1986), los coeficientes de atenuación de la radiación fotosintéticamente activa Kd_{PAR} (KIRK, 1994), la turbidez (DAVIES-COLLEY & SMITH, 2001; SAMPEDRO & SALGUEIRO, 2015; EIDAM *et al.*, 2022), la atenuación del haz (BISHOP, 1999) y otros, en los cuales los parámetros de transparencia y turbidez han sido muy estudiados en teledetección para entender las propiedades ópticas del agua (MATTHEWS, 2011).

La transparencia del agua se mide al profundizar el disco Secchi (P_{DS}) cuya aplicación va desde la visibilidad de los buceadores hasta los estudios sobre el cambio climático, cuya explicación durante más de 60 años se ha basado en la teoría de la visibilidad submarina, (LEE *et al.*, 2015).

El coeficiente de atenuación difusa vertical Kd_{PAR} representa la cantidad total de fotones de luz visible (400-700 nm) que penetran en el agua, y se utiliza para estimar la profundidad de la zona eufótica, relevante en estudios de productividad primaria (ZAPATA, 2021).

La bahía de El Ferrol localizada en Chimbote, se encuentra ubicada al norte de Lima a una distancia de 423 km, es considerada como una de las más importantes a nivel nacional, principalmente por el desarrollo de la industria pesquera y siderúrgica (LOAYZA, 1998). Las aguas residuales domésticas y de la industria pesquera son las principales fuentes de contaminación con mate-

1. INTRODUCTION

The suitability of water for various uses, such as recreation, consumption, fishing, agriculture and industry, is determined by its quality (CHAPELLE *et al.*, 2009). Increased anthropogenic activity, particularly in industrial areas, has had a negative impact on coastal zones. Monitoring and assessing surface water quality is essential for managing and improving it. Currently, *in situ* measurements and water sampling are used for subsequent laboratory analysis and evaluation (RITCHIE *et al.*, 2003).

Key indicators used to quantify water quality include transparency measured with a Secchi disk (TYLER, 1968; PREISENDORFER, 1986), the diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation - Kd_{PAR} (KIRK, 1994), turbidity (DAVIES-COLLEY & SMITH, 2001; SAMPEDRO & SALGUEIRO, 2015; EIDAM *et al.*, 2022), and beam attenuation (BISHOP, 1999), among others. Of these, transparency and turbidity have been widely analyzed through remote sensing techniques to better understand the optical properties of aquatic systems (MATTHEWS, 2011).

Water transparency, quantified using the Secchi disk depth (SDD), is a simple yet powerful indicator that has applications ranging from assessing underwater visibility for divers to monitoring long-term climate-related changes in aquatic environments. Its interpretation has been grounded for more than six decades in the theory of underwater visibility (LEE *et al.*, 2015).

The vertical diffuse attenuation coefficient (Kd_{PAR}) quantifies the reduction of visible light photons (400–700 nm) as they penetrate the water column, and it is a fundamental parameter for estimating the euphotic zone depth, which is closely linked to primary productivity (ZAPATA, 2021).

El Ferrol Bay, located in Chimbote approximately 423 km north of Lima, is one of the most important coastal areas in Peru due to its extensive fishing and steel industries (LOAYZA, 1998). Domestic wastewater and industrial discharges—particularly from fish processing—are the main sources of organic pollution affecting both Coishco and El Ferrol

ria orgánica en las bahías de Coishco y El Ferrol, siendo más impactante en esta última por tratarse de una bahía semicerrada (SÁNCHEZ *et al.*, 2008).

El objetivo de este trabajo es evaluar diversos modelos de ajuste para la estimación de la transparencia del mar y del coeficiente de atenuación difusa en la bahía El Ferrol de Chimbote, en base a observaciones *in situ* durante los años 2023 y 2024, utilizando imágenes de satélite Sentinel-2B.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Comprende la bahía El Ferrol ubicada en la Región Áncash en la costa nor-central del Perú, a una distancia aproximada de 423 km de Lima; entre las latitudes 9°4'S - 9°11'S y longitudes 78°40'W - 78°32'W, tiene 11,19 km de largo, 6,67 km de ancho, 15 km de línea de playa y profundidad media de 14 m (Fig. 1). Se analizaron 36 estaciones en dos periodos: 18 estaciones entre 17 y 21 de julio 2023 y, 18 estaciones entre 28 de mayo y 2 de junio 2024. La relación de las estaciones durante ambos periodos se adjunta en Anexo 1.

Disco Secchi. Para el cálculo de transparencia se utilizó un disco Secchi de 30 cm de diámetro pintado en color blanco.

bays, with El Ferrol experiencing more severe impacts due to its semi-enclosed configuration (SÁNCHEZ *et al.*, 2008).

This study aims to evaluate and compare different empirical models for estimating seawater transparency and the diffuse attenuation coefficient in El Ferrol Bay, Chimbote, using *in situ* observations collected during 2023–2024 together with Sentinel-2B satellite imagery.

2. MATERIALS AND METHODS

Study area. The research was conducted in El Ferrol Bay, located in the Áncash Region along Peru's north-central coast, approximately 423 km north of Lima. The bay extends between 9°04'S–9°11'S and 78°40'W–78°32'W, covering about 11.2 km in length and 6.7 km in width, with 15 km of shoreline and an average depth of 14 m (Fig. 1). Sampling was carried out at 36 stations across two field campaigns: 18 stations from July 17–21, 2023, and 18 stations from May 28–June 2, 2024. The complete list of stations for both sampling periods is provided in Annex 1.

Secchi Disk. Water transparency was determined using a 30 cm white Secchi disk.

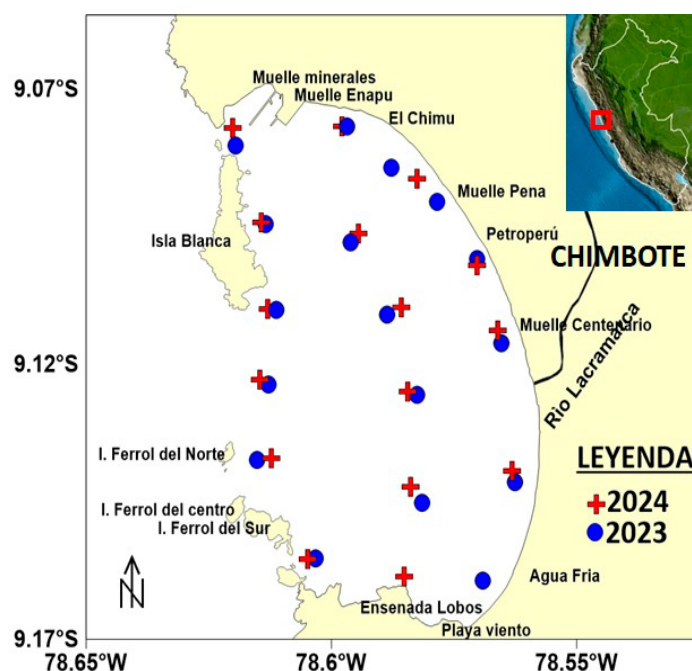


Figura 1.-Área de estudio, ubicación de las estaciones, 2023 y 2024

Figure 1. Study area, station locations, 2023 and 2024

Imágenes de satélite. Se utilizaron imágenes multispectrales del sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*) del satélite Sentinel-2B que tiene una resolución espacial de 10 m, cuyas características se muestran en la Tabla 1. Las fechas corresponden al 27 de julio 2023 y 22 de mayo 2024. La información es distribuida por el programa Copérnico de la Agencia Espacial Europea (ESA) y se encuentran disponibles en la siguiente dirección <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>, en las cuales, para el área de estudio, la imagen del 2023 fue libre de nubes y la del 2024 tiene un 10% de área cubierta por las nubes, se aplicará un filtrado de nubes para la del 2024, se describirán los detalles en la metodología.

Satellite Imagery. To complement field data, multispectral images acquired by the MSI (*MultiSpectral Instrument*) onboard the Sentinel-2B satellite were analyzed. The MSI sensor provides a 10 m spatial resolution for key visible and near-infrared bands (Table 1). The selected image dates were July 27, 2023, and May 22, 2024. The data, distributed through the Copernicus Programme of the European Space Agency (ESA), are publicly available via the Copernicus Data Space Browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). The 2023 image was cloud-free, whereas the 2024 image exhibited approximately 10% cloud coverage. Accordingly, a cloud-masking process was applied to the latter, as detailed in the methodology section.

Tabla 1.- Características espectrales de los canales utilizados del sensor MSI/Sentinel-2B (NASA EARTHDATA, s.f.)

Table 1. Spectral characteristics of the MSI/Sentinel-2B sensor bands (NASA EARTHDATA, s.f.)

Canal	Longitud de onda central λ (nm)	Ancho de canal (nm)	Resolución espacial (m)
1 – Aerosol/costa	442	21	60
2 – Azul	492	66	10
3 – Verde	559	36	10
4 – Rojo	665	31	10
5 – Borde rojo	704	16	20
6 – Borde rojo	740	15	20
7 – Borde rojo	780	20	20
8 – Infrarrojo cercano (NIR)1	833	106	10
8a -Infrarrojo cercano estrecha (NIR)2	864	22	20
9 – Vapor de agua	943	21	60
10 - Cirrus	1377	30	60
11 - Onda corta infrarroja 1 (SWIR1)	1610	94	20
12 - Onda corta infrarroja 2 (SWIR2)	2186	185	20

METODOLOGÍA

En este trabajo se registran las mediciones *in situ* de profundidad observada (transparencia) usando el disco Secchi en la bahía de Chimbote para los periodos 2023 y 2024 y se calcula el valor de Kd_{PAR} con la fórmula desarrollada por POOLE y ATKINS (1929). La Figura 2 presenta la secuencia del procesamiento para la estimación de la transparencia y del Kd_{PAR} usando los datos del Sentinel-2B. En esta sección se detallará el fundamento del Kd_{PAR} obtenido por un disco Secchi, se realizará una breve descripción de las firmas espectrales de reflectancia de los cuerpos de agua y nubes de distinta intensidad con dos finalidades:

METHODOLOGY

In situ measurements of water transparency were obtained during both field campaigns using a Secchi disk. The diffuse attenuation coefficient (Kd_{PAR}) was derived using the classical equation developed by POOLE and ATKINS (1929). Figure 2 illustrates the general workflow used to estimate water transparency and the Kd_{PAR} from Sentinel-2B imagery. This section provides the theoretical background for Kd_{PAR} estimation from Secchi depth readings and includes a description of the spectral reflectance patterns of water and clouds of varying intensities. These analyses aimed to

encontrar la combinación de canales más óptica, para la estimación del coeficiente de atenuación; elaborar un filtrado de nubes para la imagen del 2024 que tiene alta cobertura nubosa a partir de las características espectrales observadas.

(1) determine the most suitable spectral band combinations for modeling light attenuation, and (2) design a cloud-filtering algorithm for the 2024 image, which exhibited significant cloud cover.

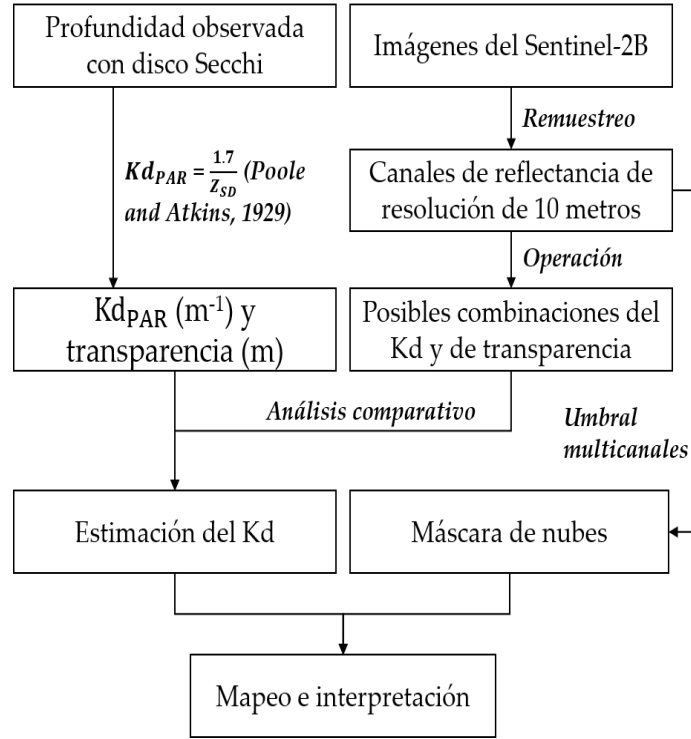


Figura 2.- Secuencia de procesamiento para la estimación de Kd_{PAR} y transparencia satelital

Figure 2. Processing sequence for estimating Kd_{PAR} and satellite transparency

Disco Secchi

Cuando un disco Secchi se sitúa en el agua a la profundidad z , la ecuación de transferencia que describe el comportamiento de absorción y la dispersión (*scattering*) de la radiación en la columna del agua, se deduce de acuerdo a PREISENDORFER (1986) y POTES *et al.* (2013):

$$\cos\theta \frac{dL_T(\theta, \varphi, z, \lambda)}{dz} = -c(z, \lambda)L_T(\theta, \varphi, z, \lambda) + L^*(\theta, \varphi, z, \lambda) \quad (1)$$

$$\cos\theta \frac{dL_B(\theta, \varphi, z, \lambda)}{dz} = -c(z, \lambda)L_B(\theta, \varphi, z, \lambda) + L^*(\theta, \varphi, z, \lambda), \quad (2)$$

donde, z es la profundidad del disco Secchi en el agua, L_T y L_B son radiancia del disco y del agua respectivamente, c es el coeficiente de atenuación total, θ y φ son los ángulos cenit del Sol y azimutal respectivamente. $L^*(\theta, \varphi, z, \lambda)$ es la función de proceso que se expresa por la ecuación (3):

Secchi Disk

When a Secchi disk is submerged to a depth z , the behavior of light absorption and scattering within the water column can be described using the radiative transfer equations outlined by PREISENDORFER (1986) and POTES *et al.* (2013):

Here, z is the disk depth, L_T and L_B are the radiances of the disk and water, respectively, c is the total attenuation coefficient, and θ and φ represent the solar zenith and azimuth angles. $L^*(\theta, \varphi, z, \lambda)$ is the source function describing scattered radiance (3):

$$L^*(\theta, \varphi, z, \lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \beta(\theta, \varphi, \theta', \varphi', z, \lambda) L(\theta', \varphi, z, \lambda) \cdot \sin\theta' d\theta' d\varphi', \quad (3)$$

donde, $\beta(\theta, \varphi, \theta', \varphi', z, \lambda)$ es la función de la dispersión (*scattering*) de volumen. $L(\theta', \varphi, z, \lambda)$ es la radiancia en dirección de 4π sobre el disco.

where $\beta(\theta, \varphi, \theta', \varphi', z, \lambda)$ represents the volume scattering function and $L(\theta', \varphi, z, \lambda)$ is the radiance in the 4π direction over the disk.

De las ecuaciones (1) y (2) se obtiene:

From equations (1) and (2), we obtain:

$$\cos\theta \frac{d[L_T(\theta, \varphi, z, \lambda) - L_B(\theta, \varphi, z, \lambda)]}{dz} = -c(z, \lambda)[L_T(\theta, \varphi, z, \lambda) - L_B(\theta, \varphi, z, \lambda)]. \quad (4)$$

La distancia entre el observador y el disco, $r = \frac{z}{\cos\theta}$ e integrando la ecuación (4):

The distance between the observer and the disk is given by $r = \frac{z}{\cos\theta}$, and by integrating equation (4):

$$\frac{L_{Tr}(\theta, \varphi, z, \lambda) - L_{Br}(\theta, \varphi, z, \lambda)}{L_{T0}(\theta, \varphi, z_0, \lambda) - L_{B0}(\theta, \varphi, z_0, \lambda)} = \exp(-cr), \quad (5)$$

donde, z_0 es la profundidad inicial (en general $z_0 = 0$ m), L_{T0} y L_{B0} son radiancia del disco y del mar en el nivel z_0 , L_{Tr} y L_{Br} son radiancia del disco y del mar en el nivel z_r .

where z_0 is the initial depth (generally $z_0 = 0$ m), L_{T0} and L_{B0} are the disk and water radiances at depth z_0 , L_{Tr} and L_{Br} are the corresponding radiances at depth z_r .

Se define C_{Vz} como un valor umbral de contraste como el límite inferior para distinguir el disco Secchi de su fondo con los ojos humanos (AAs *et al.*, 2014), este valor se expresa por la ecuación (6):

The contrast threshold (C_{Vz}) is defined as the lower limit of contrast at which the Secchi disk can still be visually distinguished from the background by the human eye (AAs *et al.*, 2014), and is expressed as:

$$C_{Vz} = \frac{L_T(\theta, \varphi, z, \lambda) - L_B(\theta, \varphi, z, \lambda)}{L_B(\theta, \varphi, z_0, \lambda)}, \quad (6)$$

donde, L_T y L_B son radiancia del disco y del agua a una profundidad z , llevando la ecuación (6) en la ecuación (5):

where L_T and L_B are the radiances of the disk and the water at depth z , respectively. Substituting equation (6) into equation (5) yields:

$$\frac{C_{Vr}(\theta, \varphi, z, \lambda)}{C_{V0}(\theta, \varphi, z_0, \lambda)} = \frac{L_{B0}(\theta, \varphi, z, \lambda)}{L_{Br}(\theta, \varphi, z_0, \lambda)} \exp(-cr). \quad (7)$$

En el agua, la radiancia se atenúa exponencialmente con respecto a la profundidad:

In water, radiance decreases exponentially with depth:

$$L_{Br}(\theta, \varphi, z, \lambda) = L_{B0}(\theta, \varphi, z_0, \lambda) \exp(-Kd_{PAR}z) = L_{B0}(\theta, \varphi, z_0, \lambda) \exp(-Kd_{PAR}r \cos\theta). \quad (8)$$

Llevando la ecuación (8) a la ecuación (7):

Substituting equation (8) into equation (7) gives:

$$\frac{C_{Vr}(\theta, \varphi, z, \lambda)}{C_{V0}(\theta, \varphi, z_0, \lambda)} = \exp[(-c + Kd_{PAR} \cos\theta) r], \quad (9)$$

POOLE y ATKINS (1929) establecieron la relación entre Kd_{PAR} y P_{DS} usando esta fórmula:

$$Kd_{PAR} = \frac{1.7}{P_{DS}} \quad (10)$$

Firmas espectrales

De las imágenes de cada fecha, se seleccionarán cinco estaciones desde la desembocadura del río Lacramarca hacia afuera de la bahía y, se registrarán las firmas espectrales de cada estación con el fin de proponer modelos de estimación de transparencia y Kd_{PAR} .

Determinación del modelo de estimación

Se utilizarán los modelos construidos por otros investigadores para estimar los parámetros de Kd_{PAR} y Transparencia y se propondrán nuevos modelos adecuados usando las características espectrales.

Filtrado de nubes

Se aplicará un filtrado de nubes a imagen del año 2024, debido a que esta imagen tenía una cobertura nubosa mayor a 10%. En el procesamiento del Sentinel-2B, un método de umbrales se usará para la detección de nubes y el cirrus (ESA, 2021) considerando una matriz de 2×2 píxeles como una unidad para aplicar los umbrales.

3. RESULTADOS

Transparencia *in situ*

La transparencia del mar en la bahía El Ferrol durante la prospección del año 2023 fluctuó entre 1,5 y cuatro metros de profundidad, los valores más altos se registraron al sur de la bahía (tres a cuatro metros) mientras que los valores mínimos ($< 2,5$ metros) se encontraron en la zona del fondeadero de las embarcaciones pesqueras. Durante la prospección del año 2024, la transparencia de la bahía fluctuó de uno a seis metros, con similar distribución al del año 2023, los valores más altos se registraron al sur de la bahía (cuatro a seis metros), mientras que en la zona cercana al desembarcadero artesanal alcanzó a 1,5 metros, los valores mínimos ($< 1,0$ m) se detectaron cerca a la desembocadura del río Lacramarca (Fig. 3).

POOLE and ATKINS (1929) established the relationship between Kd_{PAR} and P_{DS} using the following equation:

Spectral Signatures

For each acquisition date, five sampling stations will be selected along a transect extending from the mouth of the Lacramarca River toward the outer section of the bay. The spectral signatures extracted from these stations will be analyzed to develop empirical models for estimating water transparency and the diffuse attenuation coefficient (Kd_{PAR}).

Estimation Model Development

Previously published models used to estimate Kd_{PAR} and water transparency will be tested for applicability in the study area. In addition, new predictive models will be developed, incorporating the specific spectral characteristics identified in the analyzed images.

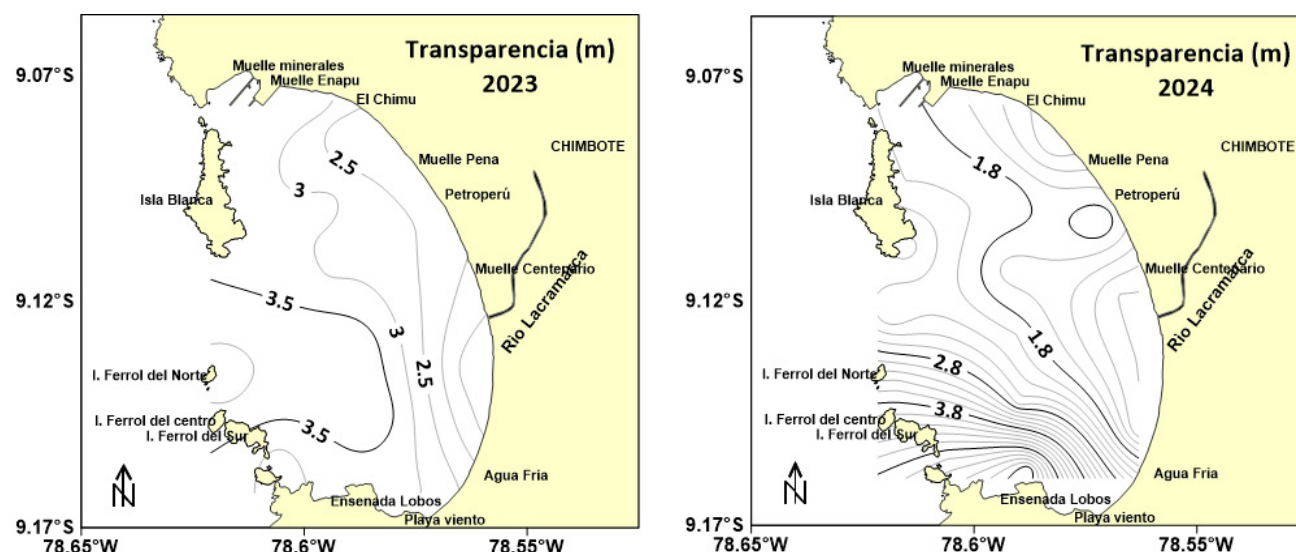
Cloud Masking

Because the 2024 image presented more than 10% cloud coverage, a cloud-masking procedure will be applied. The Sentinel-2B data will be processed using a threshold-based detection method (ESA, 2021) to identify clouds and cirrus layers. A 2×2 -pixel matrix will be used as the basic analysis unit for applying the threshold criteria.

3. RESULTS

In situ Water Transparency

During the 2023 survey, water transparency in El Ferrol Bay ranged from 1.5 to 4.0 m. The highest transparency values (3–4 m) were observed in the southern sector of the bay, whereas the lowest values (< 2.5 m) occurred near the fishing vessel anchorage. In 2024, transparency varied between 1.0 and 6.0 m, following a spatial pattern similar to that of 2023. The greatest transparency (4–6 m) was again found in the southern area, while the lowest values (~ 1.5 m) were recorded near the artisanal landing site. The minimum transparency (< 1.0 m) occurred close to the mouth of the Lacramarca River (Fig. 3).

Figura 3.- Transparencia (m) *in situ*, años 2023 y 2024Figure 3. *In situ* transparency (m), years 2023 and 2024

Coefficiente de atenuación difusa Kd_{PAR}

La Figura 4, muestra el Coeficiente de atenuación difusa Kd_{PAR} obtenida de la ecuación (10) en la bahía El Ferrol para los años 2023 y 2024. Durante el 2023 se registraron valores en el rango de $0,5$ a $1,5 \text{ m}^{-1}$, mientras que en el 2024 el rango varió de $0,3$ a $1,7 \text{ m}^{-1}$. Se puede apreciar que durante el 2023 el decaimiento exponencial de la intensidad de la luz con respecto a la profundidad fue mayor que el 2024, debido principalmente a que ese año el río Lacramarca registró un mayor flujo que se evidencia en la pluma de sedimentos registrada en las imágenes de satélite Sentinel 2B. La variabilidad interanual observada entre 2023 y 2024 refleja condiciones hidrológicas y meteorológicas distintas. En 2024, la mayor reflectancia y los valores más altos de Kd_{PAR} cerca de la costa indican una descarga fluvial más intensa, probablemente asociada a un aumento en las precipitaciones o a actividades de escorrentía urbana e industrial en la cuenca del río Lacramarca. Esta situación contrasta con julio de 2023, cuando las condiciones fueron más estables y la transparencia fue mayor en gran parte de la bahía. Estos patrones resaltan la importancia de un monitoreo continuo para detectar eventos de contaminación puntual o crónica. Además, la relación inversa entre Kd_{PAR} y transparencia, está bien establecida en la literatura (CASTILLO-RAMÍREZ *et al.*, 2020).

Firmas espectrales

La Figura 5 muestra la imagen de color verdadero para cada periodo, en la cual, se pueden observar las cinco estaciones fijas y las firmas espectrales

Diffuse Attenuation Coefficient Kd_{PAR}

Figure 4 shows the spatial distribution of the diffuse attenuation coefficient (Kd_{PAR}), estimated using Equation (10), for El Ferrol Bay in 2023 and 2024. In 2023, Kd_{PAR} ranged from 0.5 to 1.5 m^{-1} , while in 2024 it varied between 0.3 and 1.7 m^{-1} . The rate of exponential light decay with depth was higher in 2023, primarily due to increased sediment input from the Lacramarca River, evidenced by the sediment plume visible in Sentinel-2B imagery. The interannual differences observed between 2023 and 2024 reflect contrasting hydrological and meteorological conditions. In 2024, higher nearshore reflectance and elevated Kd_{PAR} values indicate intensified river discharge, likely driven by increased rainfall or greater urban and industrial runoff in the Lacramarca watershed. Conversely, the 2023 survey (July) coincided with more stable oceanographic conditions and overall higher water transparency. These variations highlight the importance of continuous monitoring to identify episodic or chronic pollution events. The inverse relationship between Kd_{PAR} and transparency is well documented in the literature (CASTILLO-RAMÍREZ *et al.*, 2020).

Spectral Signatures

Figure 5 presents true-color composite images for both study periods, together with the five fixed sampling stations and their corresponding

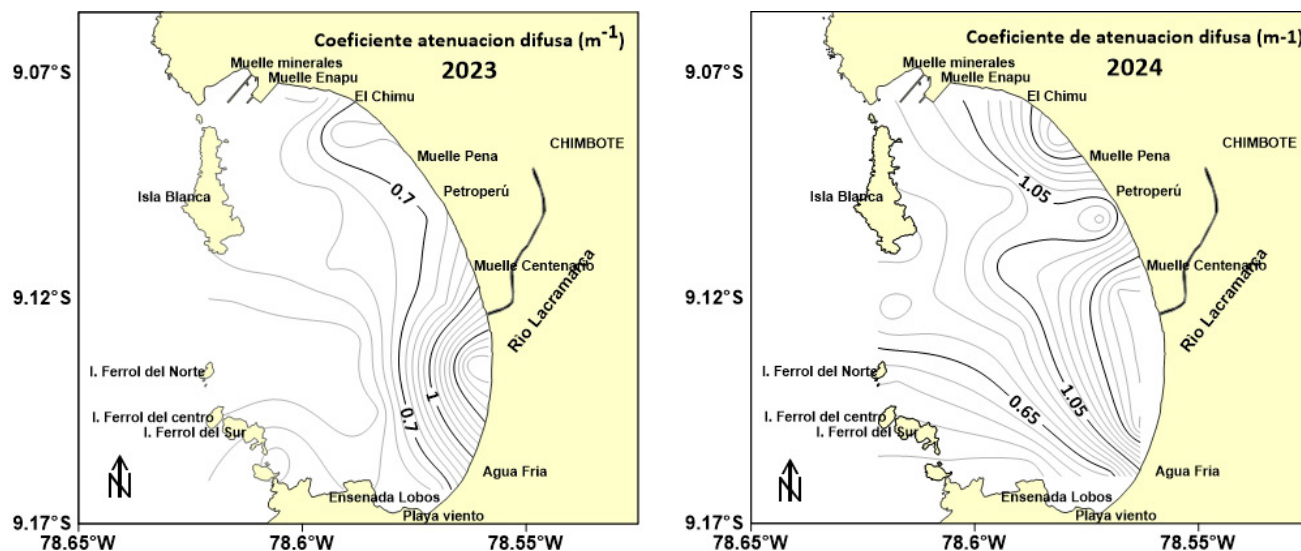


Figura 4.- Coeficiente de atenuación difusa (m-1) años 2023 y 2024

Figure 4. Diffuse attenuation coefficient (m-1) years 2023 and 2024

correspondientes. Para la imagen del 2023, en el sur de la bahía El Ferrol, se registra una masa de agua de color verde oscuro representando menor transparencia debido a la descarga del río Lacramar (Fig. 5a). En el 2024, la descarga del río se expande de su desembocadura hacia el norte por la corriente (Fig. 5b). Las cinco estaciones fijas se ubicaron en la zona donde hubo la descarga del río en el 2023. Las firmas espectrales de las estaciones muestran un patrón similar para ambos periodos, mientras una estación se aleja más de la desembocadura del río, el valor máximo de la reflectancia (representa el pico de la curva) se acerca a menor longitud de onda. El rango de la reflectancia fue de 0 a 0,07 para el 2023 y de 0,1 a 0,17 para el 2024.

Modelo de estimación de coeficiente de atenuación y transparencia

Se estimaron los parámetros de Kd_{PAR} y P_{DS} usando los modelos de monocanal y multicanal. Los valores de R^2 , RMSE, MAE y BIAS de cada modelo utilizado se muestra en los Anexos 2 (coeficiente de atenuación) y 3 (transparencia). Se realizaron regresiones lineales de la estimación de Kd_{PAR} y P_{DS} satelital por cada modelo y los datos *in situ*, en la cual, el modelo de diferencia entre los canales R_{705} y R_{740} han tenido un mayor R^2 para la estimación de Kd_{PAR} (Fig. 6a) y P_{DS} (Fig. 6b).

Este modelo de estimación de Kd_{PAR} se expresa con la ecuación (11):

$$Kd_{PAR} = 71,167 * (R_{705} - R_{740}) + 0,285 \quad (11)$$

spectral signatures. In 2023 (Fig. 5a), darker green waters were evident in the southern portion of El Ferrol Bay, indicative of reduced transparency due to sediment input from the Lacramar River. In 2024, the fluvial plume extended northward along the coast, influenced by prevailing surface currents (Fig. 5b). The five fixed stations were positioned within the area affected by the river discharge in 2023. The spectral profiles showed a consistent pattern across both periods: as stations became more distant from the river mouth, the reflectance peak shifted toward shorter wavelengths. Reflectance values ranged from 0.00 to 0.07 in 2023 and from 0.10 to 0.17 in 2024.

Estimation Models for Attenuation Coefficient and Transparency

The parameters Kd_{PAR} and P_{DS} were estimated using single-band and multiband models. Model performance metrics (R^2 , RMSE, MAE, and BIAS) are summarized in Annexes 2 (attenuation coefficient) and 3 (transparency). Linear regressions comparing satellite-derived and *in situ* measurements indicated that the model using the difference between the R_{705} and R_{740} bands yielded the highest R^2 for both Kd_{PAR} (Fig. 6a) and P_{DS} (Fig. 6b).

The model for Kd_{PAR} estimation is expressed as: (11)

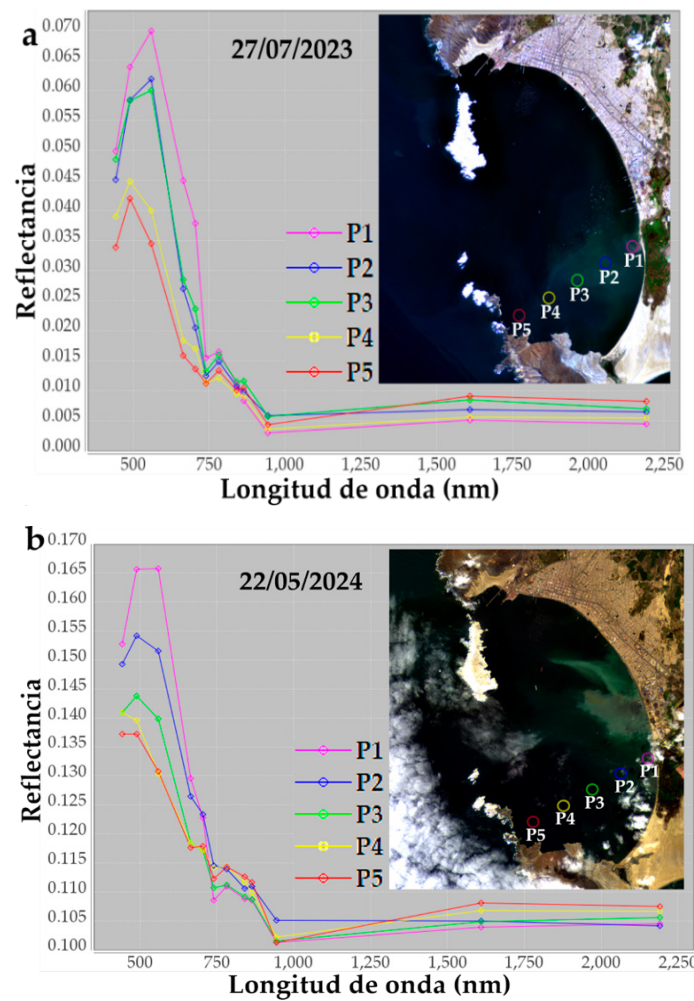


Figura 5.- Firmas espectrales de las estaciones fijas para los años (a) 2023 y (b) 2024

Figure 5. Spectral signatures of fixed stations for the years (a) 2023 and (b) 2024

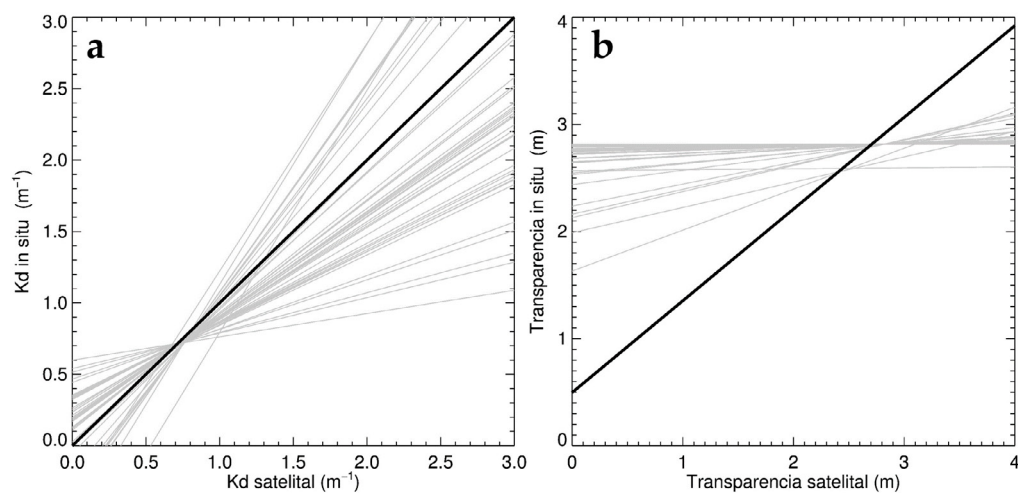


Figura 6.- Regresión lineal de cada modelo con respecto a los datos *in situ*, a) coeficiente de atenuación difusa y b) transparencia

Figure 6. Linear regression of each model with respect to the *in situ* data, a) diffuse attenuation coefficient and b) transparency

Se obtuvo un R^2 de 0,67, un RMSE de 19,00, un MAE de 14,97 y un valor de BIAS de +1,12. Para la estimación de P_{DS} se obtuvo la ecuación (12):

$$P_{DS} = 0,122 * (R_{705} - R_{740})^{-0,582} \quad (12)$$

con valor de R^2 de 0,67, un RMSE de 19,56, un MAE de 15,54 y un valor de BIAS de 0.

Filtrado de nubes

La imagen RGB Sentinel-2 del año 2024 (Fig. 7a) presentaba una cobertura nubosa mayor de 10%, por lo que se utilizó un canal de nubosidad (*quality_cloud_confidence*) que contiene la imagen original (Fig. 7b), al observar que esta banda no lograba detectar la totalidad de las nubes, se aplicó el método de umbral de nubes (Fig. 7c), encontrado los valores umbrales de 0,135, 0,118 y 0,123 para los canales de 9, 11 y 12, respectivamente.

Mapeos de la estimación

La estimación del Kd_{PAR} se muestra en la Figura 8, para julio 2023 la concentración del Kd_{PAR} fue alrededor de $0,05 \text{ m}^{-1}$ en mayor parte de la bahía, la alta concentración ($> 0,2 \text{ m}^{-1}$) se distribuyó en la desembocadura del río Lacramarca el que, debido a la descarga, tuvo una expansión de la masa de agua de concentración de $0,1 \text{ m}^{-1}$ hacia al sur de la bahía a una distancia de 2,5 mn (Fig. 8a). Para mayo 2024, se registró una masa de agua de

This model produced an R^2 of 0.67, RMSE = 19.00, MAE = 14.97, and BIAS = +1.12. For P_{DS} estimation, the following model was obtained:

with $R^2 = 0.67$, RMSE = 19.56, MAE = 15.54, and BIAS = 0.

Cloud Masking

The 2024 Sentinel-2 RGB image (Fig. 7a) exhibited cloud coverage exceeding 10%. To mitigate this, the *quality_cloud_confidence* band was initially used to detect clouded areas (Fig. 7b). However, as this band did not fully capture all cloud formations, a threshold-based method was applied (Fig. 7c), yielding threshold values of 0.135, 0.118, and 0.123 for bands 9, 11, and 12, respectively.

Estimation mappings

Figure 8 illustrates the spatial distribution of Kd_{PAR} . In July 2023, most of the bay exhibited Kd_{PAR} values around 0.05 m^{-1} , with higher concentrations ($> 0.2 \text{ m}^{-1}$) localized near the mouth of the Lacramarca River. The influence of the fluvial discharge extended southward, forming a plume with Kd_{PAR} values around 0.1 m^{-1} reaching up to 2.5 nm offshore (Fig. 8a). In May 2024, higher Kd_{PAR} values ($> 1 \text{ m}^{-1}$) were recorded

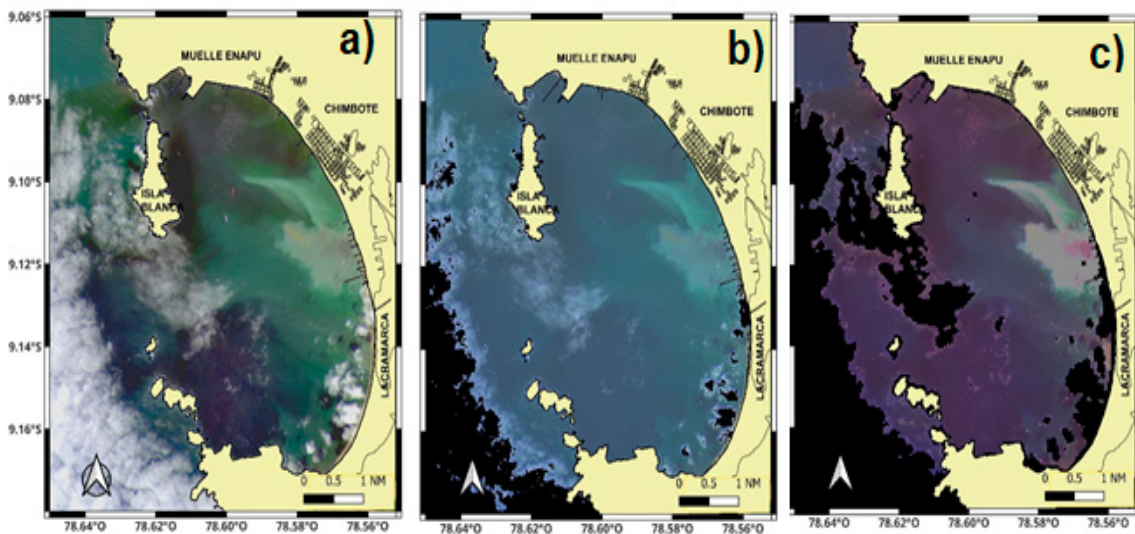


Figura 7.- Comparación de ambos métodos de filtrado de nubes: a) usando el canal de *quality_cloud_confidence* del Sentinel-2, b) método desarrollado en este trabajo

Figure 7. Comparison of both cloud-filtering methods: a) using the *quality_cloud_confidence* band from Sentinel-2, and b) the method developed in this study

concentración de Kd_{PAR} mayor a 1 m^{-1} a lo largo de la costa de Chimbote, que se extendió a 2,6 mn hacia la zona norte de la bahía (Fig. 8b).

Transparencia del mar (satelital)

La transparencia estimada muestra un patrón de distribución similar al Kd_{PAR} (Fig. 9). Para julio 2023, se observó alta transparencia ($> 3\text{ m}$) en la mayor zona de la bahía, la zona de baja transparencia ($< 1,5\text{ m}$) coincide con la alta concentración de Kd_{PAR} (Fig. 9a). Para mayo 2024, se registró un área de 2,2 mn² de aguas de baja transparencia ($< 1,5\text{ m}$) en la costa de Chimbote (Fig. 9b).

along the Chimbote coastline, extending up to 2.6 nm northward (Fig. 8b).

Satellite-Derived Water Transparency

The spatial pattern of satellite-derived transparency (Fig. 9) closely mirrored that of Kd_{PAR} . In July 2023, high transparency ($> 3\text{ m}$) dominated most of the bay, while areas of low transparency ($< 1.5\text{ m}$) coincided with regions of elevated Kd_{PAR} (Fig. 9a). In May 2024, an area of approximately 2.2 nm² with low transparency ($< 1.5\text{ m}$) was identified along the Chimbote coastline (Fig. 9b).

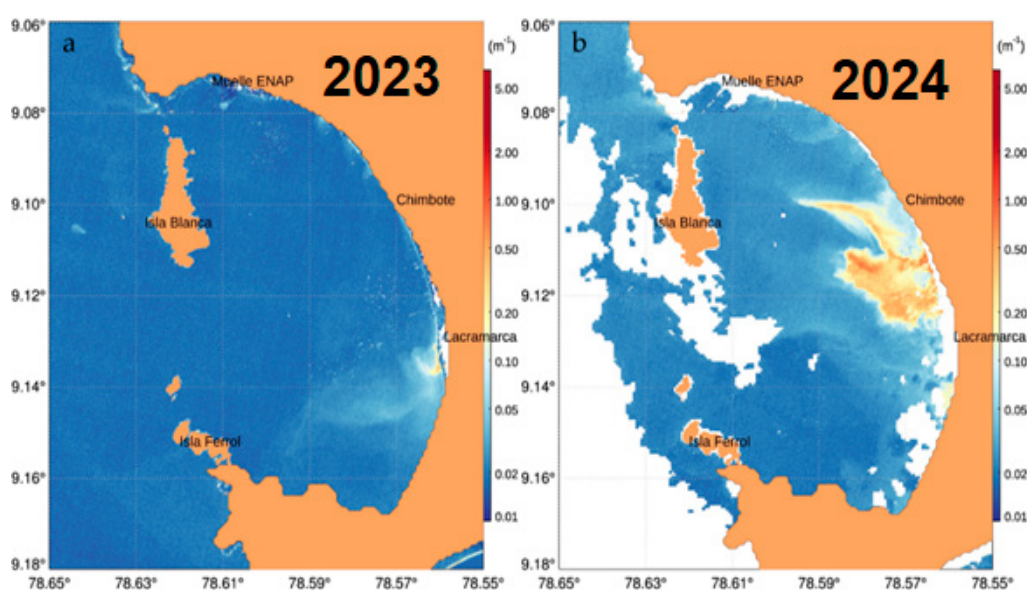


Figura 8.- Kd_{PAR} satelital en unidad de metros para años 2023 y 2024

Figure 8. Satellite-derived Kd_{PAR} in meters for the years 2023 and 2024

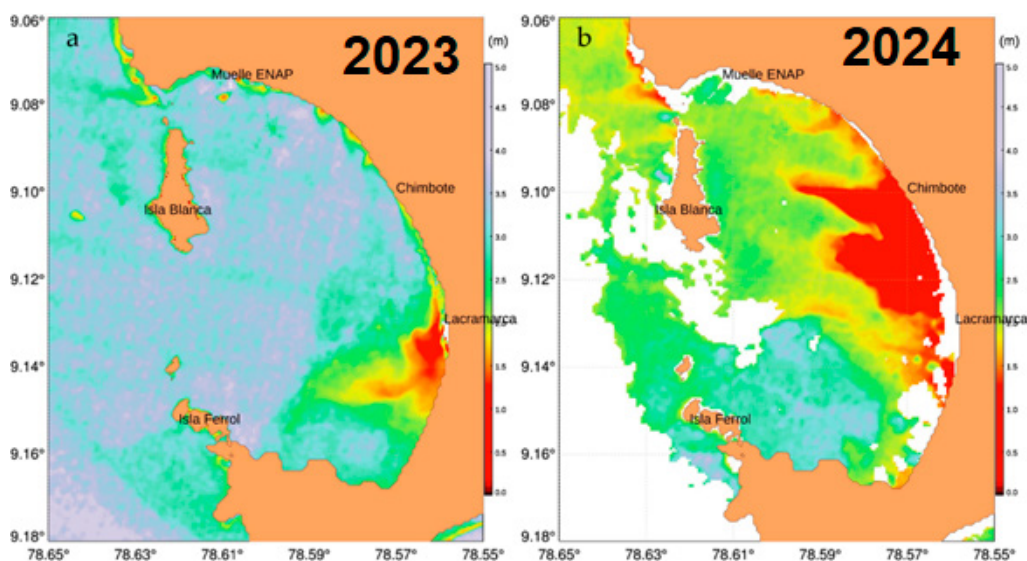


Figura 9.- Transparencia satelital en unidad de metros para años 2023 y 2024

Figure 9. Satellite-derived transparency in meters for the years 2023 and 2024

4. DISCUSIÓN

Los estudios de calidad del agua utilizando sensores remotos han demostrado que es una técnica adecuada para conocer las variaciones espaciales y temporales. Se han desarrollado diversos modelos para determinar las características bio-ópticas del mar, y para asegurar su precisión se requieren de constantes calibraciones y mediciones “*in situ*”; otra limitación sería la resolución espectral de los sensores, que va a disminuir a medida del uso, por lo que se demanda contar con sensores de características multispectrales.

Para la comparación de transparencia entre los datos satelitales e *in situ*, diversos estudios reportan que, el tiempo de desfase entre ellos varía entre uno y diez días (RODRIGUES *et al.*, 2020; OLMANSON *et al.*, 2008). En este trabajo, el promedio de desfase estuvo entre seis y diez días debido a la disponibilidad de los datos satelitales por la presencia de nubes como otros estudios (TIARASANI *et al.*, 2023; NABABAN *et al.*, 2021) ya que el objetivo fue evaluar el rendimiento general del algoritmo, no la precisión instantánea.

Para la estimación de ambos parámetros, el modelo $R_{705}-R_{740}$ obtuvo mayor correlación con los datos *in situ*; al observar las firmas espectrales de la Figura 4, la diferencia entre ambos canales es mayor cuando la intensidad de la coloración del agua es mayor. Esta fórmula ha sido desarrollada por HÄRMÄ *et al.* (2001) con los datos del satélite MERIS (canales de λ de 705 y 754 nm) para la estimación de turbidez y sólidos suspendidos en lagos y en la costa.

A pesar que las firmas espectrales de reflectancia de ambos periodos presentan patrón similar, los valores de la reflectancia del 2024 fueron más altos (+0,1) que los del 2023 (Fig. 4) es factible que la nubosidad y la concentración de sedimentos fueron factores que influyeron en esta medición (SATHYENDRANATH, 2000). De preferencia, se deben usar las imágenes libres de nubes para optimizar los resultados. Se ha desarrollado una detección de nubes usando el método umbral, las firmas espectrales de los pixeles de nubes (Fig. 10a) se caracterizan con valores de reflectancia respectivamente altos para los canales 9, 11 y 12 (líneas roja, amarilla y azul (Fig. 10b), mientras pixeles de aguas sin cobertura de nubes muestran valores mínimos en estos canales, entre ellos el canal 9 es utilizado para la detección del vapor de agua en el mar, y los valores de reflectancia de las nubes son elevados para los canales 11 y 12 (ESA, 2021).

4. DISCUSSION

Remote sensing has proven to be a reliable and efficient tool for monitoring spatial and temporal variations in water quality. Numerous models have been developed to describe the bio-optical properties of marine environments; however, ensuring their accuracy requires frequent calibration and validation through *in situ* measurements. Another limitation is the gradual decline in the spectral resolution of sensors over time, underscoring the importance of using instruments with multispectral capabilities.

When comparing transparency measurements from satellite and *in situ* data, previous research has shown that the temporal offset between them can range from one to ten days (RODRIGUES *et al.*, 2020; OLMANSON *et al.*, 2008). In this study, the average lag was approximately six to ten days, mainly due to the limited number of cloud-free satellite images available. Similar to other studies (TIARASANI *et al.*, 2023; NABABAN *et al.*, 2021), the objective was to assess the overall performance of the algorithm rather than to achieve instantaneous precision.

Among the tested models, the band difference $R_{705}-R_{740}$ showed the strongest correlation with *in situ* data. As seen in the spectral signatures (Fig. 4), this difference increases as water coloration becomes more intense. The formula was originally proposed by HÄRMÄ *et al.* (2001) using MERIS satellite data ($\lambda = 705$ and 754 nm) to estimate turbidity and suspended solids in lakes and coastal zones.

Although the reflectance spectra from both study periods exhibited similar patterns, the 2024 data showed consistently higher reflectance values (+0.1) compared to 2023 (Fig. 4). This variation is likely linked to greater cloud cover and higher sediment concentrations (SATHYENDRANATH, 2000). To improve data accuracy, the use of cloud-free satellite imagery is recommended whenever possible. Cloud detection in this study was performed using a threshold-based approach. Spectral signatures from cloud pixels (Fig. 10a) displayed high reflectance values in bands 9, 11, and 12 (represented by red, yellow, and blue lines, respectively; Fig. 10b), while water pixels without cloud cover showed minimal reflectance in these same bands. Notably, band 9 is used to detect atmospheric water vapor over oceanic regions, whereas cloud reflectance is particularly high in bands 11 and 12 (ESA, 2021).

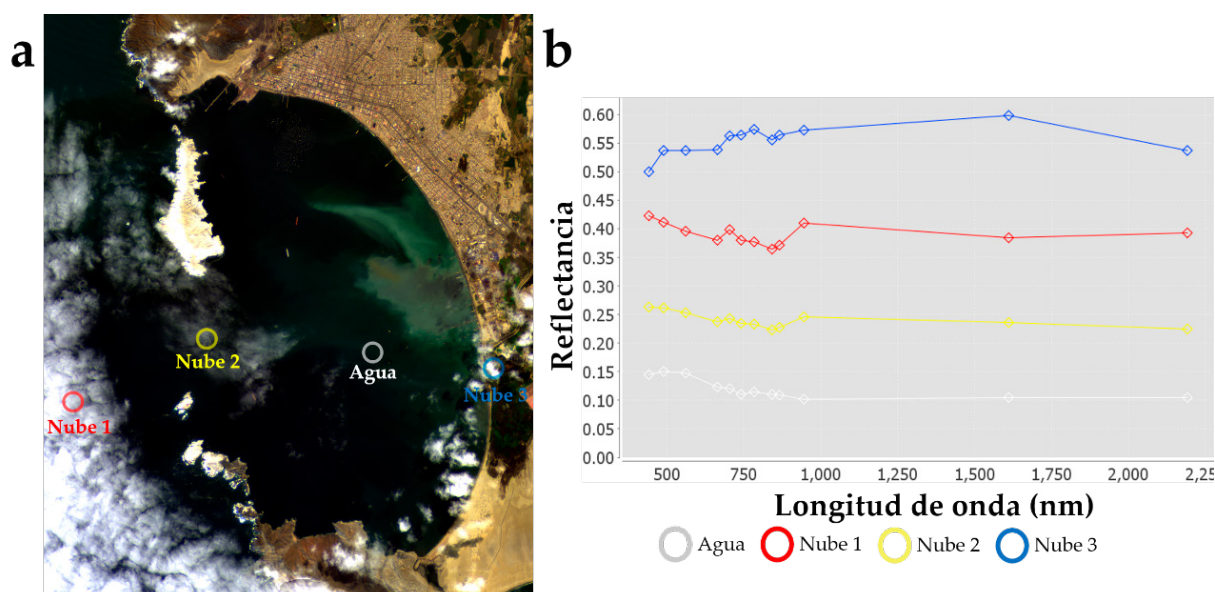


Figura 10.- Detección de nubes usando método umbral

Figure 10. Cloud detection using threshold method

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se han estimado los parámetros Kd_{PAR} y transparencia usando los datos de reflectancia del satélite Sentinel-2B, en el que, el modelo de estimación del Kd_{PAR} ha sido una fórmula de regresión lineal simple y para la estimación de la transparencia, se ha desarrollado una fórmula potencial.

Se estimó la distribución de la transparencia de la bahía usando los datos *in situ*, el patrón de la distribución es similar a la distribución de la transparencia estimada por los datos del Sentinel-2B.

Las firmas espectrales de aguas muestran un desplazamiento del pico máximo de menor a mayor longitud de onda mientras la estación se acerca a la desembocadura del río donde tiene mayor concentración de la descarga.

Al comparar con otros modelos, la combinación de la diferencia entre λ de 740 nm y 705 nm hubo el mayor de R^2 (0,67) para ambos parámetros estimados para los años 2023 y 2024.

La distribución de la Kd_{PAR} detectó una fuerte descarga del río Lacramarca en mayo 2024 y su área afectada mostró valores mayores a 1 m^{-1} que se extendieron a 2,6 mn hacia el norte de la bahía, donde la transparencia representa un valor bajo ($< 1,5 \text{ m}$) con un área estimada de $2,2 \text{ mn}^2$. Para

5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The parameters Kd_{PAR} and water transparency were derived using reflectance data from the Sentinel-2B satellite. A simple linear regression model was applied to estimate Kd_{PAR} , while transparency was modeled using a power-law equation.

The spatial distribution of transparency across El Ferrol Bay, derived from *in situ* measurements, exhibited a similar pattern to that estimated from Sentinel-2B imagery.

Spectral signatures indicated a progressive shift of the reflectance peak toward longer wavelengths as stations approached the mouth of the Lacramarca River, reflecting higher sediment and discharge concentrations.

Among the various models tested, the band difference between 705 nm and 740 nm produced the strongest correlation ($R^2 = 0.67$) with *in situ* data for both Kd_{PAR} and transparency in 2023 and 2024.

The spatial mapping of Kd_{PAR} for May 2024 revealed a pronounced river discharge plume, with elevated values exceeding 1 m^{-1} that extended approximately 2.6 nm northward from the river mouth. In the same region,

julio 2023, la bahía tuvo una condición ambiental normal, la Kd_{PAR} fue de $0,05 \text{ m}^{-1}$ y la transparencia varió entre 1,5 y 3 en la mayor parte de la bahía. Se recomienda continuar la toma de los datos *in situ* en la bahía para optimizar los coeficientes de los modelos de estimación que han sido desarrollados en este trabajo. De igual forma, la toma de los datos *in situ* deben realizarse en las mismas estaciones, con el objetivo de generar una base de datos que puedan ser comparables. También es importante realizar la toma de las firmas de reflectancia *in situ* de las estaciones para correlacionar con los datos de la profundidad del disco Secchi con mayor exactitud. Finalmente usar los datos satelitales hiperespectrales como PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, Ocean Ecosystem) para encontrar los canales más adecuados para la estimación.

transparency values were low ($< 1.5 \text{ m}$), covering an estimated 2.2 nm^2 . In contrast, environmental conditions in July 2023 were relatively stable, characterized by lower Kd_{PAR} values ($\sim 0.05 \text{ m}^{-1}$) and higher transparency ($1.5\text{--}3 \text{ m}$) throughout most of the bay. To improve model accuracy, continued *in situ* data collection is recommended at the same fixed monitoring stations to build a consistent and comparable dataset. Recording *in situ* reflectance spectra concurrently with Secchi disk depth measurements would further enhance correlation precision. Future research should also explore the use of hyperspectral satellite data—such as from the PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, Ocean Ecosystem) mission—to identify optimal wavelength bands for improved estimation of optical water properties.

6. REFERENCIAS

- AAS, E., HØKEDAL, J. & SØRENSEN, K. (2014). Secchi depth in the Oslofjord-Skagerrak area: theory, experiments and relationships to other quantities. *Ocean Sci.*, 10, 177-199. <https://doi.org/10.5194/os-10-177-2014>
- BISHOP, J. K. B. (1999). Transmissometer measurements of POC. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 46(2), 353-369. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00069-7)
- CABALLERO, I., STEINMETZ, F. & NAVARRO, G. (2018). Evaluation of the first year of operational Sentinel-2A data for retrieval of suspended solids in medium-to high-turbidity waters. *Remote Sensing*, 10, 982. <https://doi.org/10.3390/rs10070982>
- CASTILLO-RAMÍREZ, A., SANTAMARÍA-DEL-ÁNGEL, E., GONZÁLES-SILVERA, A., FROUIN, R., SEBASTIÁ-FRASQUET, M. T., TAN, J., LOPEZ-CALDERON, J., SÁNCHEZ-VELASCO, L. & ENRÍQUEZ-PAREDES, L. (2020). A new algorithm to estimate diffuse attenuation coefficient from Secchi disk depth. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 558. <https://doi.org/10.3390/jmse8080558>
- CHAPELLE, F. H., BRADLEY, P. M., MCMAHON, P. B. & LINDSEY, B. D. (2009). What does “water quality” mean?. *Ground Water*, 47(6), 752-754. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00569.x>
- DAVIES-COLLEY, R. J. & SMITH, D. G. (2001). Turbidity, suspended sediment, and water clarity: a review. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1085-1101. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x>
- DOXARAN, D., FROIDEFOND, J.-M. & CASTAING, P. (2002). A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5079-5085. <https://doi.org/10.1080/0143116021000009912>
- DOXARAN, D., FROIDEFOND, J.-M., CASTAING, P. & BABIN, M. (2009). Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81, 321-332. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.11.013>
- EIDAM, E. F., LANGHORST, T., GOLDSTEIN, E. B. & MCLEAN, M. (2022). Open OBS: Open-source, low-cost optical backscatter sensors for water quality and sediment-transport research. *Limnology and Oceanography: Methods*, 20, 46-59. <https://doi.org/10.1002/lom3.10469>
- ERENA, M., DOMÍNGUEZ, J. A., AGUADO-GIMÉNEZ, F., SORIA, J. & GARCÍA-GALIANO, S. (2019). Monitoring coastal lagoon water quality through remote sensing: The Mar Menor as a case study. *Water*, 11, 1468. <https://doi.org/10.3390/w11071468>
- ESA. (2021). S2 MPC Level-2A algorithm theoretical basis document. Ref. S2-PDGS-MPC-ATBD-L2A. <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.10.0/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-ATBD-V2.10.0.pdf>
- GITELSON, A. (1993). The nature of the peak near 700 nm on the radiance spectra and its application for remote estimation of phytoplankton pigments in inland waters. *SPIE*, 1971, 170-179. <https://doi.org/10.1117/12.150992>
- HÄRMÄ, P., VEPSÄLÄINEN, J., HANNONEN, T., PYHÄLAHTI, T., KÄMÄRI, J., KALLIO, K., ELOHEIMO, K. & KOPONEN, S. (2001). Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland. *The Science of the Total Environment*, 268, 107-121. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00688-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00688-4)
- HOU, X., FENG, L., DUAN, H., CHEN, X., SUN, D. & SHI, K. (2017). Fifteen-year monitoring of the turbidity dynamics in large lakes and reservoirs in the middle and lower basin of the Yangtze River, China. *Remote Sensing of Environment*, 190, 107-121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.006>
- KALLIO, K., KUTSER, T., HANNONEN, T., KOPONEN, S., PULLIÄINEN, J., VEPSÄLÄINEN, J. & PYHÄLAHTI, T. (2001). Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. *The Science of the Total Environment*, 268, 59-77. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00685-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00685-9)

- KIRK, J. T. O. (1994). *Light & photosynthesis in aquatic ecosystems* (2ª ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623370>
- KOPONEN, S., ATILA, J., PULLIAINEN, J., KALLIO, K., PYHÄLAHTI, T., LINDFORS, A., RASMUS, K. & HALLIKAINEN, M. (2007). A case study of airborne and satellite remote sensing of a spring bloom event in the Gulf of Finland. *Continental Shelf Research*, 27, 228-244. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.10.006>
- LATHROP, R. G. & LILLESAND, T. M. (1989). Monitoring water quality and river plume transport in Green Bay, Lake Michigan with SPOT-1 imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(3), 349-354. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1989journal/mar/1989_mar_349-354.pdf
- LEE, Z. P., SHANG, S., HU C., DU, K., WEIDEMANN, A., HOU, W., LIN, J. & LIN, G. (2015). Secchi disk depth: a new theory and mechanistic model for underwater visibility. *Remote Sensing Environment*, 169, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.002>
- LOAYZA, R. (1998). *Génesis de la perturbación de la bahía El Ferrol*. Universidad Nacional del Santa.
- MATTHEWS, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6855-6899. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>
- MOLNER, J. V., SORIA, J. M., PEREZ-GONZALEZ, R. & SORIA-PERPINYA, X. (2023). Measurement of turbidity and total suspended matter in the Albufera of Valencia Lagoon (Spain) using Sentinel-2 images. *J. Mar. Sci. Eng.*, 11, 1894. <https://doi.org/10.3390/jmse11101894>
- NABABAN, B., ULFAH, D. & PANJAITAN, J. P. (2021). Light propagation, coefficient attenuation, and the depth of one optical depth in different water types. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 944, 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012047>
- NASA EARTHDATA. (s.f.). Sentinel-2MSI. Multispectral Imager. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/sentinel-2-msi>
- OLMANSON, L. G., BAUER, M. E. & BREZONIK, P. L. (2008). A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*, 112, 4086-4097. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.013>
- PETUS, C., CHUST, G., GOHIN, F., DOXARAN, D., FROIDEFOND, J.-M. & SAGARMINAGA, Y. (2010). Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*, 30, 379-392. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007>
- POOLE, H. H. & ATKINS, W. R. G. (1929). Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 16(1), 297-324. <https://doi.org/10.1017/S0025315400029829>
- POTES, M., JOAO M., COSTA, O., SALGADO, R., BORTOLI, D., SERAFIM, A. & Le MOIGNE, P. (2013). Spectral measurements of underwater downwelling radiance of inland water bodies. *Tellus A*, 65, 20774. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.20774>
- PREISENDORFER, R. W. (1986). Secchi disk science: Visual optics of natural waters. *Limnology and Oceanography*, 31(5), 909-926. <https://doi.org/10.4319/lo.1986.31.5.0909>
- RITCHIE, J. C., ZIMBA, P. V. & EVERITT, J. H. (2003). Remote sensing techniques to assess water quality. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 69(6), 695-704. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.695>
- RODRÍGUEZ, G., POTES, M., COSTA, M. J., NOVAIS, M. H., Penha, A. M., Salgado, R. & Morais, M. M. (2020). Temporal and spatial variations of Secchi depth and diffuse attenuations coefficient from Sentinel-2 MSI over a Large Reservoir. *Remote Sens.*, 12(5), 768. <https://doi.org/10.3390/rs12050768>
- SAMPEDRO, Ó. & SALGUEIRO, J. R. (2015). Turbidimeter and RGB sensor for remote measurements in an aquatic medium. *Measurement*, 68, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.049>
- SÁNCHEZ, G., TRAVEZAÑO, E. & GARCÍA, V. (2008). Bahías El Ferrol y Coishco, Chimbote, Perú: Evaluación ambiental en abril y julio 2002. *Inf Inst Mar Perú*, 35(1), 7-26. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/1846>
- SATHYENDRANATH, S. (Ed.). (2000). *Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically-complex waters* (IOCCG Report Number 3). International Ocean-Colour Coordinating Group. <https://ioccg.org/group/sathyendranath/>
- TIARASANI, A., SIREGAR, V. P. & GAOL, J. L. (2023). Estimation of diffuse coefficient attenuation (K_d 490) using sentinel 2A in Panggang Island and its Surrounding Water. *UIO Cibf, Ser.; Eartg Ebvurib, Sci*, 1251, 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1251/1/012029>
- TYLER, J. E. (1968). The Secchi Disc. *Limnology and Oceanography*, 13(1), 1-6. <https://doi.org/10.4319/lo.1968.13.1.0001>
- VERDIN, J. P. (1985). Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with Landsat imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(3), 343-353. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1985journal/mar/1985_mar_343-353.pdf
- ZAPATA, HINESTROZA, J. A. (2021). *Estimación del coeficiente de atenuación vertical de la radiación fotosintéticamente activa (K_d (PAR)), mediante el coeficiente de atenuación vertical de la luz difusa a 490 nm (k_d (490))* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California]. Repositorio Institucional UABC. <https://hdl.handle.net/20.500.12930/9253>
- ZHAN, Y., DELEGIDO, J., ERENA, M., SORIA, J. M., RUIZ-VERDÚ, A., URREGO, P., SORIA-PERPINYA, X., VICENTE, E. & MORENO, J. (2022). Mar Menor lagoon (SE Spain) chlorophyll-*a* and turbidity estimation with Sentinel-2. *Limnética*, 41(2), 305-323. <https://doi.org/10.23818/limn.41.18>

ANEXO 1 / ANNEX 1

Relación de las estaciones en la bahía El Ferrol para el periodo 2023 y 2024

Station overview in El Ferrol Bay for the 2023–2024 period

	Fecha	Hora	Longitud (°)	Latitud (°)	Disco Secchi (m)	Nubes/ruidos
1	17/07/2023	09:34	-78.570	-9.166	2,9	
2	17/07/2023	10:48	-78.606	-9.158	2,8	
3	17/07/2023	12:49	-78.563	-9.151	1,3	
4	18/07/2023	10:09	-78.584	-9.149	3,9	
5	18/07/2023	10:48	-78.618	-9.142	4,2	
6	18/07/2023	12:20	-78.562	-9.138	1,1	
7	18/07/2023	12:46	-78.588	-9.133	3,9	
8	18/07/2023	13:13	-78.616	-9.126	3,8	
9	19/07/2023	10:29	-78.568	-9.125	2,1	
10	19/07/2023	12:16	-78.594	-9.116	2,9	
11	19/07/2023	11:30	-78.613	-9.112	3	
12	19/07/2023	13:08	-78.571	-9.105	2,4	
13	20/07/2023	09:52	-78.594	-9.101	3,1	
14	20/07/2023	10:24	-78.615	-9.097	3,1	
15	20/07/2023	11:48	-78.577	-9.094	2,2	Si
16	20/07/2023	12:22	-78.597	-9.079	3,4	
17	20/07/2023	12:45	-78.592	-9.087	2,1	
18	21/07/2023	10:45	-78.621	-9.083	3,1	
1	28/05/2024	09:04	-9.163	-78.570	3	
2	28/05/2024	09:39	-9.161	-78.588	6	
3	28/05/2024	10:03	-9.159	-78.606	5	
4	28/05/2024	11:02	-9.152	-78.563	1	Si
5	28/05/2024	12:17	-9.146	-78.590	2,5	Si
6	28/05/2024	12:57	-9.142	-78.617	3,5	
7	29/05/2024	12:56	-9.137	-78.564	1	Si
8	29/05/2024	13:24	-9.131	-78.590	2	
9	29/05/2024	13:54	-9.126	-78.619	2	Si
10	30/05/2024	11:11	-9.122	-78.568	1	Si
11	30/05/2024	13:13	-9.116	-78.592	1,5	
12	30/05/2024	13:48	-9.112	-78.615	2,5	
13	31/05/2024	10:07	-9.106	-78.572	2	Si
14	31/05/2024	11:39	-9.100	-78.593	2	
15	31/05/2024	12:11	-9.097	-78.615	2	
16	1/06/2024	10:58	-9.088	-78.582	1	
17	2/06/2024	10:16	-9.080	-78.597	1,5	
18	2/06/2024	10:56	-9.080	-78.622	2	Si

ANEXO 2 / ANNEX 2

Coefficientes estadísticos de las combinaciones utilizadas para estimación del coeficiente de atenuación
Statistical parameters of the combinations applied for estimating the attenuation coefficient

Combinación (x)	Fórmula (y=f(x))	R²	RMSE	MAE	BIAS	Referencia	
R443	$32.764x^2 - 3.830x + 0.735$	0,02	34,01	24,75	2,24	Petus <i>et al.</i> , 2010	
R490	$13.309x^2 - 0.428x + 0.646$	0,05	33,46	24,25	2,66		
R560	$5.574x^2 + 1.264x + 0.590$	0,08	45,75	30,00	-23,48		
R665	$39.297x^2 - 3.527x + 0.692$	0,04	33,74	24,45	2,12	Verdin <i>et al.</i> , 1985	
R705	$0.108 \ln(x) + 1.120$	0,07	41,20	37,41	24,82	Kallio <i>et al.</i> , 2001	
R740	$189.98x^2 - 21.383x + 0.833$	0,01	34,71	25,96	2,51	Zhan <i>et al.</i> , 2022	
R783	$244.07x^2 - 28.653x + 0.917$	0,03	34,04	25,34	2,19		
R842	$243.76x^2 - 27.854x + 0.877$	0,03	34,00	25,59	1,79		
R865	$290.81x^2 - 32.65x + 0.891$	0,04	33,94	25,82	2,75	Caballero <i>et al.</i> , 2018	
R945	$140.43x^2 - 13.174x + 0.693$	0,01	34,80	26,81	2,41	Doxaran <i>et al.</i> , 2002	
R1610	$154.54x^2 - 16.134x + 0.778$	0,01	34,95	26,09	3,34		
R2190	$158.67x^2 - 16.33x + 0.769$	0,01	34,72	25,94	3,48		
R560	$-2.409x^2 + 5.925x - 2.798$	0,07	32,91	25,97	5,02	Zhan <i>et al.</i> , 2022	
R443	$1.303x^2 - 1.016x + 0.852$	0,05	33,54	25,81	4,87		
R865							
R490							
R865	$2.304x^2 - 2.125x + 1.087$	0,14	32,08	25,44	5,22	Zhan <i>et al.</i> , 2022	
R443	$-4.204x^2 + 7.033x - 2.106$	0,06	32,98	26,08	4,99		
R443							
R560							
R490	$10.66x^2 - 25.677x + 15.927$	0,33	28,15	20,07	2,68		
R560	$-2.413x^2 + 3.294x - 0.203$	0,09	32,71	24,34	3,72		
R705							
R490							
R740	$0.024x^2 + 0.146x + 0.679$	0,00	34,28	25,98	4,67		
R560	$0.762x^2 - 1.024x + 1.065$	0,04	33,48	26,33	5,19		
R740							
R665							
R705	$-2.651x^2 + 4.472x - 1.089$	0,00	34,12	27,33	4,89		
R665	$0.035x^2 - 0.288x + 1.149$	0,05	33,70	24,99	3,97		
R560							
R665							
R560	$0.012x^2 - 0.168x + 1.035$	0,04	33,79	24,74	4,18		
R705	$1.441x^2 - 1.252x + 0.927$	0,05	33,63	25,72	4,81		
R783							
R490							
R665	$-1.108x^2 + 1.834x + 0.1$	0,05	33,51	25,30	3,99	Hou <i>et al.</i> , 2017	
R560	$0.948x^2 - 0.774x + 0.838$	0,04	33,59	25,90	5,06	Doxaran <i>et al.</i> , 2009	
R865							
R560							
R490	$0.344x^2 - 1.407x + 1.921$	0,02	34,31	25,39	4,25	Doxaran <i>et al.</i> , 2009	
R443	$2.413x^2 + 8.119x - 5.909$	0,09	32,71	24,34	3,72		
R490 + R705							
R490							
R490 - R705	$-2.413x^2 + 1.532x + 0.678$	0,09	32,71	24,34	3,73		
R490	$3x^2 - 4.917x + 2.578$	0,32	28,43	22,14	0,24		
R443 - R783							
R490 - R705							
R560 - R490	$41.704x^2 + 8.587x + 0.905$	0,32	28,20	20,05	2,73	Gitelson, 1993	
R560 + R490	$-1.247x^2 + 0.307x + 0.843$	0,05	33,57	24,63	3,94		
R490 - R705							
R490 + R783							
R665 - R1610	$1.093x^2 - 0.343x + 0.744$	0,07	32,81	26,08	5,42		
R665 + R1610	$-2.034x^2 + 0.633x + 0.829$	0,09	32,87	24,53	3,82		
R490 - R705							
R490 + R705							
R665 + R560	$-0.304x^2 + 1.543x + 0.882$	0,16	31,83	23,66	3,08		
R490 + R490	$-0.351x^2 + 0.591x + 0.534$	0,02	33,83	26,51	4,97		
R705 - R783							
R665 - R783							

$\frac{R_{705} + R_{665}}{R_{665} - R_{560}}$	$-1.206x^2 + 4.146x + 2.704$	0,03	33,90	24,27	4,06	
$\frac{R_{705} - R_{740}}{R_{665} - R_{740}}$	$0.393x^2 - 0.648x + 1.012$	0,00	34,17	26,44	5,03	
$\frac{R_{560} + R_{705}}{R_{560} + R_{665}}$	$28.519x^2 - 58.136 + 30.328$	0,01	33,79	27,06	4,94	
$\frac{R_{705} \cdot R_{705}}{R_{490} - R_{705}}$	$168.16x^2 - 15.68x + 0.733$	0,04	34,32	25,81	2,27	
$\frac{R_{490} \cdot R_{490}}{R_{560} \cdot R_{665}}$	$0.006x^2 - 0.141x + 1.477$	0,04	33,60	24,40	2,93	
$\frac{R_{490} \cdot R_{490}}{R_{560} \cdot R_{665}}$	$29.66x^2 - 1.924x + 0.664$	0,06	33,41	24,16	1,95	
$\frac{1}{R_{490}} - \frac{1}{R_{705}}$	$0.003x + 0.859$	0,08	33,05	24,91	4,12	
$\log_{10}(\frac{R_{433}}{R_{560}})$	$-16.879x^2 - 2.834x + 0.720$	0,06	32,96	26,04	5,01	
$\log_{10}(\frac{R_{490}}{R_{560}})$	$55.274x^2 - 9.883x + 0.905$	0,32	28,20	20,05	2,74	
$\frac{R_{705} - R_{740}}{R_{560} - R_{490}}$	$71.167x + 0.285$	0,67	19,00	14,97	1,12	Härmä <i>et al.</i> , 2001
$\frac{R_{560} + R_{490}}{R_{560} + R_{705}}$	$1.303x^2 - 1.016x + 0.852$	0,32	28,20	20,05	2,73	Erena <i>et al.</i> , 2019
$\frac{R_{560} + R_{665}}{R_{705}}$	$28.519x^2 - 58.136x + 30.328$	0,01	33,79	27,06	4,94	Hou <i>et al.</i> , 2017
$\frac{R_{560} + R_{665}}{R_{443} - R_{665}}$	$-7.378x^2 + 6.128x - 0.422$	0,04	33,80	24,70	4,12	Koponen <i>et al.</i> , 2007
$\frac{R_{560} - R_{665}}{R_{490}}$	$-0.612x + 0.609$	0,30	28,81	21,74	-2,09	Härmä <i>et al.</i> , 2001
$\frac{R_{490}}{R_{443} + R_{560}}$	$27.59x^2 - 34.855x + 11.536$	0,11	32,80	24,09	2,79	Lathrop & Lillesand, 1989

ANEXO 3 / ANNEX 3

Coeficientes estadísticos de las combinaciones utilizadas para la estimación de la transparencia

Statistical parameters of the combinations used for estimating water transparency

Combinación (x)	Fórmula (y=f(x))	R ²	RMSE	MAE	BIAS	Referencia
R ₄₄₃	$1.907x^{-0.105}$	0,02	33,94	25,00	1,06	Petus <i>et al.</i> , 2010
R ₄₉₀	$1.813x^{-0.129}$	0,05	33,33	24,42	1,56	
R ₅₆₀	$1.705x^{-0.148}$	0,08	47,47	31,79	-25,50	
R ₆₆₅	$1.924x^{-0.087}$	0,04	33,58	24,60	1,06	Verdin <i>et al.</i> , 1985
R ₇₀₅	$1.944x^{-0.083}$	0,07	40,53	36,51	23,57	Kallio <i>et al.</i> , 2001
R ₇₄₀	$2.219x^{-0.04}$	0,01	34,57	26,12	1,37	
R ₇₈₃	$597.08x^2 - 71.904x + 2.267$	0,03	34,02	25,62	0,96	Zhan <i>et al.</i> , 2022
R ₈₄₂	$2.222x^{-0.04}$	0,03	33,87	25,74	0,69	
R ₈₆₅	$-678.84x^2 + 78.135x + 2.359$	0,04	33,99	26,14	1,44	Caballero <i>et al.</i> , 2018
R ₉₄₅	$92.599x^2 - 11.505x + 2.91$	0,01	34,73	27,01	1,20	
R ₁₆₁₀	$2.169x^{-0.046}$	0,01	34,76	26,19	2,21	
R ₂₁₉₀	$2.146x^{-0.048}$	0,01	34,50	26,00	2,41	Doxaran <i>et al.</i> , 2002
R ₅₆₀	$10.941x^2 - 27.682x + 19.808$	0,07	33,17	26,45	3,47	
R ₄₄₃	$-5.19x^2 + 4.867x + 2.092$	0,05	33,34	25,85	3,77	
R ₄₉₀	$-7.83x^2 + 7.898x + 1.396$	0,14	31,90	25,46	4,14	Zhan <i>et al.</i> , 2022
R ₈₆₅	$19.839x^2 - 32.221x + 15.434$	0,06	33,21	26,53	3,47	
R ₄₄₃	$2.16x^{2.975}$	0,33	28,03	20,22	1,74	
R ₅₆₀	$5.426x^2 - 6.923x + 4.682$	0,09	32,62	24,53	2,57	
R ₇₀₅	$-1.087x^2 + 1.207x + 2.573$	0,00	34,19	26,18	3,41	
R ₄₉₀	$-1.043x^2 + 2.021x + 1.954$	0,04	33,58	26,67	3,76	
R ₇₄₀	$21.468x^2 + 40.277x - 15.968$	0,00	34,30	27,73	3,38	
R ₆₆₅	$-0.0249x^2 + 0.224x + 2.495$	0,05	33,48	25,04	2,93	
R ₇₀₅	$0.005x^2 + 0.007x + 2.646$	0,04	33,59	24,83	3,09	
R ₇₈₃	$-5.23x^2 + 5.336x + 1.826$	0,05	33,40	25,73	3,74	Molner <i>et al.</i> , 2023
R ₄₉₀	$2.098x^2 - 3.001x + 3.757$	0,05	33,33	25,39	2,89	
R ₆₆₅	$-3.953x^2 + 3.979x + 2.145$	0,04	33,51	26,08	3,81	
R ₅₆₀	$2.342x^2 - 5.528x + 6.024$	0,02	34,14	25,51	3,10	Doxaran <i>et al.</i> , 2009
R ₄₄₃	$3.372x^{-0.613}$	0,09	32,62	24,53	2,57	
R ₄₉₀	$5.426x^2 - 3.928x + 3.185$	0,09	32,62	24,53	2,57	
R ₄₄₃	$-8.478x^2 + 14.861x - 3.335$	0,32	27,97	21,66	-0,05	Gitelson, 1993
R ₄₉₀	$-108.99x^2 - 22.602x + 2.379$	0,32	28,10	20,23	1,78	
R ₅₆₀	$2.911x^{0.085}$	0,05	33,38	24,73	2,86	
R ₆₆₅	$-2.518x^2 + 0.629x + 2.885$	0,07	33,11	26,58	3,83	
R ₁₆₁₀	$-5.154x^2 - 2.378x + 2.856$	0,09	32,69	24,62	2,75	
R ₄₉₀	$3.227x^2 - 10.907x + 11.721$	0,16	31,48	23,50	2,32	
R ₇₀₅	$2.473x^{-0.121}$	0,02	33,88	26,81	3,58	
R ₆₆₅	$3.018x^{-0.356}$	0,03	33,78	24,47	2,88	
R ₇₀₅						

$\frac{R_{705} - R_{740}}{R_{665} - R_{740}}$	$-2.875x^2 + 4.133x + 1.432$	0,00	34,34	26,87	3,52	
$\frac{R_{560} + R_{705}}{R_{560} + R_{665}}$	$-256.97x^2 + 504.11x - 244.29$	0,01	34,07	27,54	3,35	
$\frac{R_{705} \cdot R_{705}}{R_{490} + R_{705}}$	$-211.64x^2 + 19.765x + 2.817$	0,04	33,93	25,61	1,49	
$\frac{R_{490} \cdot R_{490}}{R_{560} \cdot R_{665}}$	$-0.015x^2 + 0.301x + 1.439$	0,04	33,55	24,66	1,73	
$\frac{R_{490} \cdot R_{490}}{R_{560} \cdot R_{665}}$	$-149.8x^2 + 16.778x + 2.752$	0,06	33,20	24,24	0,96	
$\frac{1}{1} - \frac{1}{1}$	$-0.00003x^2 - 0.008x + 2.62$	0,08	32,88	25,01	3,02	
$\log_{10}(\frac{R_{433}}{R_{560}})$	$78.947x^2 + 15.222x + 3.061$	0,06	33,20	26,51	3,48	
$\log_{10}(\frac{R_{490}}{R_{560}})$	$-144.28x^2 + 26.004x + 2.379$	0,32	28,10	20,23	1,78	
$\frac{R_{705} - R_{740}}{R_{560} - R_{490}}$	$0.122x^{-0.582}$	0,67	19,56	15,54	0,00	Härmä <i>et al.</i> , 2001
$\frac{R_{560} + R_{490}}{R_{560} + R_{705}}$	$-13.818x^2 + 2.396$	0,32	28,10	20,23	1,78	Erena <i>et al.</i> , 2019
$\frac{R_{560} + R_{665}}{R_{705}}$	$-256.97x^2 + 504.11x - 244.29$	0,01	34,07	27,54	3,35	Hou <i>et al.</i> , 2017
$\frac{R_{560} + R_{665}}{R_{443} - R_{665}}$	$2.035x^{-0.221}$	0,04	33,68	24,88	2,95	Koponen <i>et al.</i> , 2007
$\frac{R_{560} - R_{665}}{R_{490}}$	$2.231x + 0.849$	0,30	29,58	22,58	-3,61	Härmä <i>et al.</i> , 2001
$\frac{R_{443} + R_{560}}{R_{443} + R_{560}}$	$7.978x - 1.794$	0,11	32,39	23,85	2,10	Lathrop & Lillesand, 1989