

Caballero, G.; Sòria-Perpinyà, X.; Alvado, B.; Ruíz-Verdú, A.; Soria, J.; Vicente, E.; Durán Lalaguna, C.; Ortega Terol, D.; Moreno, J.; Delegido Gómez, J. Algoritmos para la estimación de la calidad del agua de la Albufera de Valencia con imágenes Sentinel-2

Algoritmos para la estimación de la calidad del agua de la Albufera de Valencia con imágenes Sentinel-2

Caballero, Gabriel Rodrigo¹ **Sòria-Perpinyà, Xavier**¹ **Alvado, Bárbara**¹ **Ruíz-Verdú, Antonio**¹ **Soria, Juan Miguel**² **Vicente, Eduardo**² **Durán Lalaguna, Concha**³ **Ortega Terol, Damián**³ **Moreno, José**¹ **Delegido Gómez, Jesús**¹

¹ Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universitat de València, España

² Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE). Universitat de València.

³ Confederación Hidrográfica del Júcar, Valencia

ORCID: Caballero 0000-0003-2268-2674 Sòria-Perpinyà 0000-0001-8080-5826 Alvado 0000-0002-7304-2688 Ruíz-Verdú 0000-0001-6832-3496 Soria 0000-0001-5249-8590 Vicente 0000-0002-8814-9912 Ortega Terol 0000-0001-8107-5693 Moreno 0000-0002-5283-3333 Delegido Gómez 0000-0002-2819-6979

Correspondencia: gabriel.caballero@uv.es javier.soria-perpina@uv.es barbara.alvado@uv.es antonio.ruiz@uv.es juan.soria@uv.es eduardo.vicente@uv.es mariaconcepcion.duran@chj.es damian.ortega@chj.es jose.moreno@uv.es jesus.delegido@uv.es

RESUMEN

La Albufera de Valencia presenta graves problemas de eutrofización desde los años 70. Debido a su alto interés, se han hecho multitud de trabajos científicos aplicando la teledetección al estudio de la calidad de sus aguas. Sin embargo, recientes cambios como el gran crecimiento de nuevas especies de fitoplancton o las fuertes inundaciones, requieren la búsqueda de nuevos modelos para el uso de la teledetección en este lago, pues han cambiado sus propiedades ópticas. En este trabajo, utilizando datos de campo obtenidos entre 2016 y 2025, se han calibrado diferentes índices espectrales para la estimación de distintas variables biofísicas de calidad de aguas usando Sentinel-2. Las variables en estudio han sido la concentración de clorofila-a, la ficocianina, los sólidos totales en suspensión, la profundidad del Disco de Secchi y el contenido en fósforo total. Los modelos muestran NRMSE variables entre 15 y 26% y permiten tanto la elaboración de mapas de las diferentes variables como la obtención de series temporales que nos pueden proporcionar un conocimiento más profundo del estado y los cambios de la Albufera.

Palabras clave: *Clorofila, ficocianina, sólidos en suspensión, Disco de Secchi, fósforo*



Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 17 febrero 2026

Algoritmos para la estimación de la calidad del agua de la Albufera de Valencia con imágenes Sentinel-2

Caballero, Gabriel Rodrigo ⁽¹⁾, Sòria-Perpinyà, Xavier ⁽¹⁾, Alvado, Bárbara ⁽¹⁾, Ruíz-Verdú, Antonio ⁽¹⁾, Soria, Juan Miguel ⁽²⁾, Vicente, Eduardo ⁽²⁾, Durán Lalaguna, Concha ⁽³⁾, Ortega Terol, Damián ⁽³⁾, Moreno, José ⁽¹⁾, Delegido Gómez, Jesús ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universitat de València, España.

 0000-0003-2268-2674 gabriel.caballero@uv.es ;  0000-0001-8080-5826, javier.soria-perpina@uv.es


 0000-0002-7304-2688, barbara.alvado@uv.es ;  0000-0001-6832-3496, antonio.ruiz@uv.es

 0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es ;  0000-0002-2819-6979, jesus.delegido@uv.es

⁽²⁾ Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE). Universitat de València.

 0000-0001-5249-8590, juan.soria@uv.es ;  0000-0002-8814-9912, eduardo.vicente@uv.es

⁽³⁾ Confederación Hidrográfica del Júcar.

mariaconcepcion.duran@chj.es ;  0000-0001-8107-5693, damian.ortega@chj.es

Resumen: La Albufera de Valencia presenta graves problemas de eutrofización desde los años 70. Debido a su alto interés, se han hecho multitud de trabajos científicos aplicando la teledetección al estudio de la calidad de sus aguas. Sin embargo, recientes cambios como el gran crecimiento de nuevas especies de fitoplancton o las fuertes inundaciones, requieren la búsqueda de nuevos modelos para el uso de la teledetección en este lago, pues han cambiado sus propiedades ópticas. En este trabajo, utilizando datos de campo obtenidos entre 2016 y 2025, se han calibrado diferentes índices espectrales para la estimación de distintas variables biofísicas de calidad de aguas usando Sentinel-2. Las variables en estudio han sido la concentración de clorofila-a, la ficocianina, los sólidos totales en suspensión, la profundidad del Disco de Secchi y el contenido en fósforo total. Los modelos muestran NRMSE variables entre 15 y 26% y permiten tanto la elaboración de mapas de las diferentes variables como la obtención de series temporales que nos pueden proporcionar un conocimiento más profundo del estado y los cambios de la Albufera.

Palabras clave: Clorofila, ficocianina, sólidos en suspensión, Disco de Secchi, fósforo.

Algorithms for water quality assessment in the Albufera of Valencia using Sentinel-2 satellite imagery

Abstract: *The Albufera of Valencia has faced severe eutrophication problems since the 1970s. Due to its high ecological and scientific interest, numerous studies have applied remote sensing to assess its water quality. However, recent changes—such as the proliferation of novel phytoplankton species and major flooding events—require the development of new remote sensing models for this lagoon, as its optical properties have shifted. In this study, using field data collected between 2016 and 2025, we calibrated various spectral indices to estimate key biophysical water quality variables with Sentinel-2 imagery. The variables analyzed include chlorophyll-a concentration, phycocyanin, total suspended solids, Secchi disk depth, and total phosphorus content. The resulting models exhibit NRMSE values ranging from 15% to 26% and enable both the production of spatial distribution maps for each variable and the generation of time series, which can provide deeper insight into the ecological status and ongoing changes in the Albufera.*

Keywords: *Chlorophyll, phycocyanin, suspended solids, Secchi disk, phosphorus.*

1. INTRODUCCIÓN

La Albufera de Valencia, que presenta graves problemas de eutrofización, es el mayor lago de agua dulce español. Rodeado de arrozales y próximo a la ciudad de Valencia

tiene un alto interés tanto para la agricultura, ecología, pesca y turismo como por ser una importante reserva de aves, por lo que ha sido ampliamente estudiado con técnicas de teledetección por diferentes autores (López-García y Caselles, 1990; Doña *et al.*, 2014). Durante los

últimos años, gracias a la disponibilidad de imágenes del programa Copernicus, se han desarrollado modelos para la estimación de diferentes variables de calidad del agua en la Albufera, como la concentración de clorofila-a (Chl-a) que es un indicador de la cantidad de fitoplancton, la concentración de ficocianina (PC) presente en las cianobacterias que pueden aportar toxicidad al agua, los sólidos totales en suspensión (TSM), la transparencia a través de la profundidad del Disco de Secchi (SDD) y el contenido en fósforo total (PT) (Sòria-Perpinyà *et al.*, 2019; 2020a; 2020b; 2021; Molner *et al.*, 2023).

Sin embargo, recientes cambios producidos en el lago, como el crecimiento masivo de una nueva especie de fitoplancton en 2023 o las consecuencias de las inundaciones del 29 de octubre de 2024, han provocado la modificación de las condiciones del lago y por tanto de sus propiedades ópticas, lo que obliga a recalibrar o incluso buscar nuevos algoritmos incluyendo datos de campo más recientes.

El objetivo de este trabajo es presentar nuevos algoritmos para la estimación de la Chl-a, PC, TSM, SDD y PT en la Albufera de Valencia a partir de imágenes Sentinel-2 (S2) de nivel L2A, usando datos de campo obtenidos en muestreos realizados entre 2016 y 2025.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y medidas in situ

La Albufera de Valencia (Fig. 1) es un sistema acuático regulado por las actividades humanas, principalmente el cultivo del arroz. Con una profundidad media de 1 m es un sistema hipertrófico con valores de Chl-a que pueden llegar a superar los 350 µg/L y valores de SDD que varían entre 0,15 y 0,4 m.

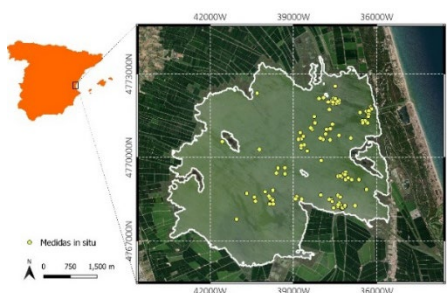


Figura 1. Localización y puntos de muestreo en la Albufera de Valencia. CRS: EPSG:3857 - WGS 84 / Pseudo-Mercator.

En este estudio utilizaremos datos de campo obtenidos en diferentes muestreos realizados entre 2016 y 2025, coincidentes con imágenes de S2 sin nubes en la zona Albufera. En cada campaña se realizaron medidas de radiometría y SDD en varios de los puntos mostrados en la Fig.1 y se tomaron muestras de agua que fueron procesadas en el laboratorio para la obtención de Chl-a, PC, TSM y PT según la metodología descrita en (Sòria-Perpinyà *et al.*, 2021).

2.2. Metodología

De las imágenes S2 nivel L2A (con corrección atmosférica) coincidentes con los datos de campo se

han extraído los espectros de reflectividad, promediados en una ventana de 3x3 píxeles de 10 m alrededor de las coordenadas del punto de muestreo. La inmensa mayoría de los datos de campo coinciden en fecha con la toma de imágenes de satélite, pues esto se tiene en cuenta en la planificación de los muestreos, junto a las condiciones meteorológicas adecuadas (evitando nubosidad y fuertes vientos). Con la herramienta *Automated Radiative Transfer Models Operator* (ARTMO) de libre acceso disponible en <https://artmotoolbox.com/> se han calibrado diferentes índices espectrales usando validación cruzada con 4 subconjuntos de datos para evaluar el rendimiento de cada modelo. Los índices que se han probado son el Cociente Simple, el Índice de Diferencia Normalizado, el índice tribanda de Dall'Olmo (TBDO) (Dall'Olmo *et al.*, 2003), el Maximum Chlorophyll Index (MCI) y un índice de tres bandas obtenido al multiplicar un cociente simple por otra banda. Para seleccionar el mejor índice con la combinación óptima de bandas se ha tenido en cuenta el coeficiente de determinación (R^2), el error absoluto medio (MAE), el error absoluto medio porcentual (MAP), el error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio normalizado (NRMSE).

3. RESULTADOS

Para la estimación de la Chl-a fue suficiente el recalibrado del índice TBDO. Para ello se utilizaron 262 datos. La Figura 2 muestra la relación entre los datos de campo y el índice, por lo que la Chl-a se puede obtener con la ecuación:

$$\text{Chl-a } (\mu\text{g/L}) = 247,54 \text{ TBDO} + 10,643 \quad (1)$$

Donde
$$\text{TBDO} = R_{740} \left(\frac{1}{R_{665}} - \frac{1}{R_{705}} \right) \quad (2)$$

Siendo R_i la reflectividad en la banda centrada en la longitud de onda i (en nm). Este modelo permite estimar la Chl-a en la Albufera con un RMSE de 42,4 µg/L y un NRMSE del 26%.

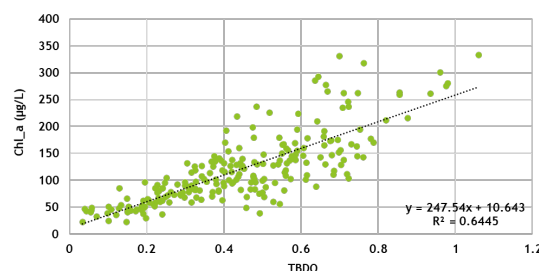


Figura 2. Valores de campo de Chl-a en función del índice tribanda obtenido con S2.

En el caso de la ficocianina no fue suficiente el reajuste y se calibró un nuevo algoritmo, para lo cual se usaron 127 datos. La Figura 3 muestra el ajuste con mejores estadísticos, obtenido con el índice MCI (Índice Máximo de Clorofila) y que se puede calcular como:

$$\text{PC}(\mu\text{g/L}) = -16840 \text{ MCI} - 8,5045 \quad (3)$$

Donde

$$\text{MCI} = R_{665} - 1,3 (R_{490} + (R_{705} - R_{490}) 0,46) \quad (4)$$

La validación registró unos errores asociados al algoritmo de 160 µg/L de RMSE y un 17% de NRMSE.

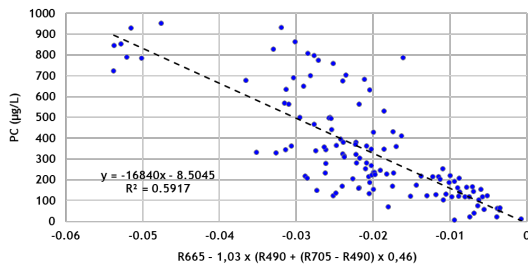


Figura 3. Valores de campo de ficocianina en función del índice tribanda calculado con S2.

Para los TSM también fue necesario desarrollar un nuevo algoritmo, para lo que se disponía de un total de 144 datos. La Figura 4 muestra el calibrado del índice, que en este caso es una combinación de tres bandas, con lo que la ecuación obtenida es:

$$TSM(mg/L) = 396,37 \left(\frac{R_{705}}{R_{665}} \right) + 30,651 \quad (5)$$

El cálculo de los estadísticos de validación obtuvo un RMSE de 19 mg/L y un NRMSE del 15%.

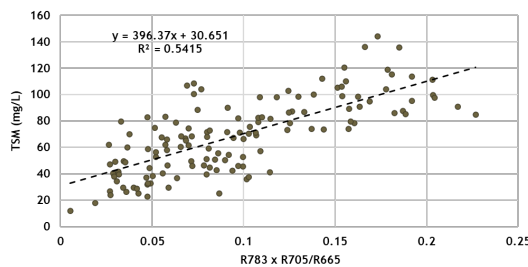


Figura 4. Valores de campo de TSM en función del índice obtenido con S2.

La estimación de la SDD también requirió de la obtención de un nuevo modelo. Para ello, se han utilizado un total de 238 datos. El nuevo modelo se obtuvo con el índice MCI, cuyo ajuste se muestra en la Figura 5 y que permite calcular SDD con las ecuaciones:

$$SDD (m) = -3,2279 MCI + 0,3971 \quad (6)$$

donde

$$MCI = R_{705} - 1,3 (R_{665} + (R_{560} - R_{665}) 0,5) \quad (7)$$

Los resultados de la validación del modelo fueron un 0,05 m de RMSE y un 16% de NRMSE.

Respecto al algoritmo de estimación del PT, y teniendo en cuenta que el fósforo no cambia las propiedades ópticas del agua, se ha trabajado en obtener una estimación indirecta a través de la correlación entre PT y Chl-a. Aunque hay un desfase entre la entrada de nutrientes y el crecimiento algal, Quinlan *et al.* (2021) en su estudio con datos de 3.874 lagos distribuidos en 47 países, encontraron una relación lineal positiva entre TP y Chl-a en concentraciones intermedias de TP, es decir, el rango entre 4 y 230 µg/L, justo en el que se encuentran la mayoría de las muestras de que disponemos.

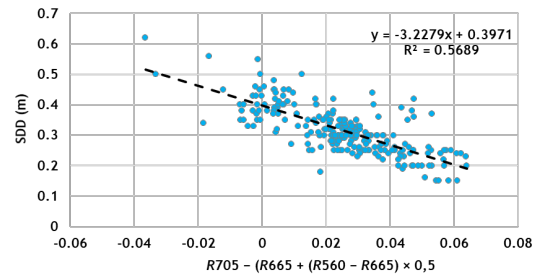


Figura 5. Valores *in situ* de SDD en función del índice MCI.

Para obtener el PT a partir de la Chl-a se correlacionaron los 92 datos de campo disponibles con ambas variables (Figura 6), obteniéndose una relación muy significativa, con un R² de 0,7.

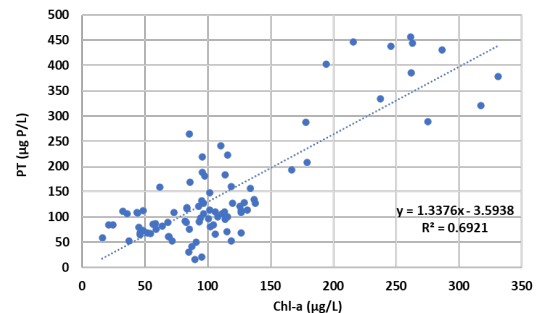


Figura 6. Diagrama de dispersión entre los datos *in situ* de PT y los de Chl-a.

Por tanto, la fórmula para la obtención del PT a partir de la Chl-a es la siguiente:

$$PT (\mu g/L) = 1,3376 Chl-a_{estimada} - 3,5983 \quad (8)$$

Donde Chl-a_{estimada} se calcula con S2 usando la ecuación 1, obteniéndose con este método un RMSE de 83 µg/L y un NRMSE del 19% para la estimación del PT.

La aplicación de las anteriores ecuaciones permite elaborar mapas de las distintas variables indicativas de la calidad del agua de la Albufera de Valencia, mostrando su distribución espacial. Esto es especialmente útil en el caso de la Albufera debido a que tiene diferentes aportes de agua por varios puntos procedentes de distintos sitios y calidades diferentes. Además, la posibilidad del trabajo en la nube, también facilita la elaboración de series temporales, por ejemplo con Google Earth Engine o con la plataforma de la ESA, Copernicus Browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>).

Como ejemplo, en la Figura 7 se muestra la variación temporal de la Chl-a y del PT, mostrando la relación directa entre ambas variables y la desviación estándar (sombreado) de cada una. Esto se ha realizado en Copernicus Browser, definiendo previamente una región de interés que solo contenga píxeles de agua en la Albufera, eliminando píxeles próximos a la costa e islas. En cada fecha con imagen sin nubes se ha calculado el valor medio y la desviación estándar de cada variable dentro de esa región de interés.

Hay que advertir que en la variación espacial y las series temporales el PT seguirá la misma variación que la Chl-a (Fig. 7). Y, aunque en circunstancias concretas, como

la entrada de materia alóctona que aporta PT por arrastre, el cálculo de PT sea probablemente inferior al real, las estimaciones realizadas sí que nos servirán para obtener, por el momento, valores más próximos a los de campo y así poder observar posibles anomalías a lo largo del tiempo.

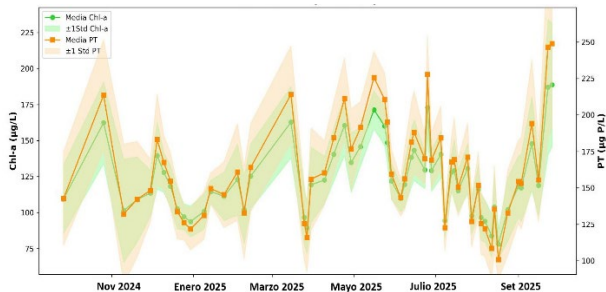


Figura 7. Evolución temporal en los dos últimos años de la Chl-a y PT en el lago de la Albufera.

Otro ejemplo que puede servir para mostrar la evolución de una variable biofísica y la gran variabilidad espacial, se muestra en la Figura 8, donde se ha representado la media y desviación estándar de la transparencia a través del SDD, calculada con la ecuación 6, en la zona de interés dentro de la Albufera. Esta gráfica muestra no solo la heterogeneidad del lago que da valores muy altos de desviación estándar, sino que también se aprecia una cierta variación estacional en la transparencia, con valores más altos hacia el final del verano casi todos los años.

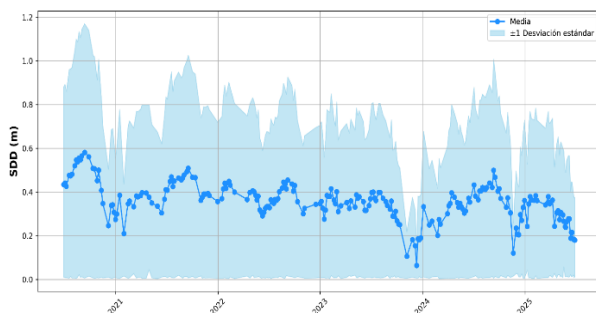


Figura 8. Evolución temporal en los últimos cinco años de la transparencia (SDD) en el lago de la Albufera.

4. CONCLUSIONES

A partir de una extensa base de datos de campo que abarca desde 2016 a 2025, se han calibrado índices espectrales para la estimación de la Chl-a, PC, TSM, SDD y PT en la Albufera de Valencia usando S2 nivel L2A. Las mejores relaciones se han obtenido con el tribanda de Dall’Olmo para la Chl-a, MCI con las bandas roja, azul y Red-Edge para la PC, una combinación de dos bandas del Red-Edge y la del rojo para los TSM, y un MCI con rojo, verde y Red-Edge para la SDD. Además, se ha comprobado la relación entre la Chl-a y el fósforo que permite obtener una estimación indirecta de PT con imágenes S2. Estos métodos permiten la elaboración de mapas y series temporales usando el trabajo en la nube en Copernicus Browser, obteniendo las variables en estudio con errores que van desde un

15% de NRMSE para TSM hasta un NRMSE del 26% para el caso de la Chl-a.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Convenio de colaboración entre CHJ y UV 2024-2026 “SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUAS EN EMBALSES, LAGOS Y OTRAS MASAS DE AGUA DE LA CUENCA A PARTIR DE DATOS DE SENSORES REMOTOS (TELEDEMB)”

6. REFERENCIAS

- Dall’Olmo, G., Gitelson, A. A., & Rundquist, D. C. (2003). Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, 30(18).
- Doña, C., Sanchez, J. M., Caselles, V., Domínguez, J. A., & Camacho, A. (2014). Empirical relationships for monitoring water quality of lakes and reservoirs through multispectral images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(5), 1632-1641.
- López García, M. J., & Caselles, V. (1990). A multi-temporal study of chlorophyll-a concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain, using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 11(2), 301-311.
- Molner, J. V., Soria, J. M., Pérez-González, R., & Sòria-Perpinyà, X. (2023). Measurement of turbidity and total suspended matter in the Albufera of Valencia lagoon (Spain) using Sentinel-2 images. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1894.
- Quinlan, R., Filazzola, A., Mahdiyan, O., Shuvo, A., Blagrove, K., Ewins, C., ... & Sharma, S. (2021). Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide. *Limnology and Oceanography*, 66(2), 392-404.
- Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., ... & Moreno, J. (2020a). Remote sensing of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) using multitemporal Sentinel-2 images. *Science of the Total Environment*, 698, 134305.
- Sòria-Perpinyà, X., Urrego, E. P., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Soria, J. M., Delegido, J., ... & Moreno, J. (2020b). Monitoring water transparency of a hypertrophic lake (the Albufera of València) using multitemporal Sentinel-2 satellite images. *Limnetica*, 39(1), 373-386.
- Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., ... & Moreno, J. (2021). Validation of water quality monitoring algorithms for sentinel-2 and sentinel-3 in mediterranean inland waters with in situ reflectance data. *Water*, 13(5), 686.