

Caballero Cañas, G.; Sòria-Perpinyà, X.; Alvaro Arranz, B.; Ruiz-Verdú, A.; Vicente, E.; Durán Lalaguna, C.; Ortega Terol, D.; Delegido, J. Implementación de modelos biogeoquímicos con Sentinel-2 para la monitorización sistemática de embalses mediterráneos de aguas claras mediante Copernicus Browser

Implementación de modelos biogeoquímicos con Sentinel-2 para la monitorización sistemática de embalses mediterráneos de aguas claras mediante Copernicus Browser

Caballero Cañas, Gabriel Rodrigo ¹ Sòria-Perpinyà, Xavier ¹ Alvaro Arranz, Bárbara ¹ Ruiz-Verdú, Antonio ¹ Vicente, Eduardo ² Durán Lalaguna, Concha ³ Ortega Terol, Damián ³ Delegido, Jesús ¹

¹ Laboratorio de procesamiento de imágenes (IPL), Universidad de Valencia

² Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE), Universidad de Valencia

³ Confederación hidrográfica del Júcar (CHJ)

ORCID: Caballero 0000-0003-2268-2674 Sòria-Perpinyà 0000-0001-8080-5826 Alvaro Arranz 0000-0002-7304-2688 Ruiz-Verdú 0000-0001-6832-3496 Vicente 0000-0002-8814-9912 Ortega Terol 0000-0001-8107-5693 Delegido 0000-0002-2819-6979

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

RESUMEN

La monitorización sistemática de las masas de agua continentales constituye un elemento clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos y el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua. En este trabajo se presenta el proyecto TELEDEMB, centrado en la calibración y operacionalización de modelos biogeoquímicos basados en imágenes Sentinel-2 Nivel 2A para la estimación de clorofila-a (Chl-a), sólidos totales en suspensión (TSM), profundidad del disco de Secchi (SDD) y ficocianina (PC) en embalses mediterráneos de aguas claras pertenecientes a la cuenca hidrográfica del Júcar. Los modelos empíricos fueron ajustados mediante datos in situ y reflectancias atmosféricamente corregidas. La principal contribución del estudio radica en la implementación de los modelos en JavaScript para su ejecución directa en Copernicus Browser, transformando desarrollos científicos en herramientas operativas accesibles para gestores ambientales. Este enfoque permite la generación de mapas temáticos y series temporales sin necesidad de flujos de procesamiento avanzados, fortaleciendo la toma de decisiones basada en datos de observación de la Tierra.

Palabras clave: *Calidad Agua, Clorofila-a, Modelos bio-ópticos, Copernicus Browser, operacionalización.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 21 febrero 2026


Implementación de modelos biogeoquímicos con Sentinel-2 para la monitorización sistemática de embalses mediterráneos de aguas claras mediante Copernicus Browser

Caballero Cañas, Gabriel Rodrigo ⁽¹⁾, Sòria-Perpinyà, Xavier ⁽¹⁾, Alvaro Arranz, Bárbara ⁽¹⁾, Ruiz-Verdú, Antonio ⁽¹⁾, Vicente, Eduardo ⁽²⁾, Durán Lalaguna, Concha ⁽³⁾, Ortega Terol, Damián ⁽³⁾, Delegido, Jesús ⁽¹⁾, Moreno, José ⁽¹⁾


⁽¹⁾ Laboratorio de procesamiento de imágenes (IPL), Universidad de Valencia.

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

⁽²⁾ Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE), Universidad de Valencia.

 0000-0002-8814-9912, eduardo.vicente@uv.es

⁽³⁾ Confederación hidrográfica del Júcar (CHJ).

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

Resumen: La monitorización sistemática de las masas de agua continentales constituye un elemento clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos y el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua. En este trabajo se presenta el proyecto TELEDEMB, centrado en la calibración y operacionalización de modelos biogeoquímicos basados en imágenes Sentinel-2 Nivel 2A para la estimación de clorofila-a (Chl-a), sólidos totales en suspensión (TSM), profundidad del disco de Secchi (SDD) y ficocianina (PC) en embalses mediterráneos de aguas claras pertenecientes a la cuenca hidrográfica del Júcar. Los modelos empíricos fueron ajustados mediante datos in situ y reflectancias atmosféricamente corregidas. La principal contribución del estudio radica en la implementación de los modelos en JavaScript para su ejecución directa en Copernicus Browser, transformando desarrollos científicos en herramientas operativas accesibles para gestores ambientales. Este enfoque permite la generación de mapas temáticos y series temporales sin necesidad de flujos de procesamiento avanzados, fortaleciendo la toma de decisiones basada en datos de observación de la Tierra.

Palabras clave: Calidad del agua, Clorofila-a, Modelos bio-ópticos, Copernicus Browser, operacionalización.

Implementation of biogeochemical models with Sentinel-2 for the systematic monitoring of Mediterranean clearwater reservoirs through Copernicus Browser

Abstract: Sustainable monitoring of inland water bodies is essential for environmental management and compliance with the European Water Framework Directive. This work presents the TELEDEMB project, focused on the calibration and operational implementation of biogeochemical models using Sentinel-2 Level 2A imagery for the estimation of chlorophyll-a (Chl-a), total suspended matter (TSM), Secchi disk depth (SDD), and phycocyanin (PC) in clear Mediterranean reservoirs of the Júcar river basin in Spain. Empirical models were calibrated using in situ measurements and atmospherically corrected surface reflectance. Beyond scientific model development, the main contribution of this work lies in the operational implementation of the algorithms in JavaScript, enabling direct execution within the Copernicus Browser. This approach transforms scientific equations into accessible environmental monitoring tools, allowing stakeholders and environmental managers to generate spatial maps and time series without advanced processing workflows. Results demonstrate robust model performance and highlight the importance of bridging scientific research and operational Earth Observation services.

Keywords: Water Quality, Chlorophyll-a, Bio-optical Modelling, Copernicus Browser, Operational Monitoring.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad hídrica se ha consolidado como uno de los desafíos más críticos del siglo XXI. En un escenario de cambio climático antropogénico, las masas de agua continentales enfrentan presiones sin precedentes debido a la eutrofización, la escasez de recursos y la alteración de los ciclos biogeoquímicos (Palmer *et al.*, 2015). Los embalses de la cuenca del Júcar, vitales para el riego agrícola y el consumo humano, requieren una vigilancia continua que la limnología tradicional, basada en muestreos puntuales *in situ*, no puede satisfacer debido a sus limitaciones en resolución espacial y temporal. En este contexto, la misión Sentinel-2 (S2) de la Agencia Espacial Europea (ESA), integrada en el programa Copernicus, ha revolucionado la teledetección hidrológica. Gracias al sensor Multi-Spectral Instrument (MSI), esta constelación ofrece una combinación única de alta resolución espacial (10, 20 y 60 metros), una resolución radiométrica de 12 bits y una frecuencia de revisita menor de 5 días sobre Europa (Drusch *et al.*, 2012). Estas características permiten capturar variaciones en la reflectancia de aguas claras (oligotróficas y mesotróficas), cuya firma espectral está dominada por la absorción del agua y por los constituyentes ópticamente activos (Morel y Prieur, 1997; Odermatt *et al.*, 2012). Fluctuaciones sostenidas en la concentración de clorofila-a (Chl-a), la profundidad del disco de Secchi (SDD), la materia total suspendida (TSM) o la ficocianina (PC) constituyen indicadores determinantes de la evolución del estado trófico en ecosistemas lénticos. No obstante, el procesamiento masivo de estos datos a nivel de usuario final suele verse limitado por la alta demanda de recursos computacionales y la complejidad técnica que implica la gestión de grandes volúmenes de datos. Con la finalidad de abordar esta problemática, el proyecto TELEDEMB propone un flujo de trabajo que trasciende la investigación teórica para enfocarse en la implementación operativa de modelos de monitoreo de variables de calidad del agua. Los objetivos principales de este estudio son:

- (i) Desarrollar modelos biogeoquímicos regionales calibrados específicamente para la respuesta espectral de los embalses mediterráneos, optimizando algoritmos empíricos y semianalíticos para datos S2 de nivel 2A (S2-L2A).
- (ii) Facilitar la transferencia de conocimiento mediante el uso de Custom Scripts (Evals-scripts) integrados en Copernicus Browser.

Esta transición hacia una "arquitectura de soluciones EO" permite que los algoritmos de estimación de Chl-a, SDD, TSM y PC se ejecuten en tiempo real sobre la infraestructura en la nube de Copernicus, democratizando el acceso a la información geoespacial. El usuario final (gestores de cuencas o técnicos ambientales) puede visualizar cartografía de calidad de agua y analizar series temporales sin necesidad de software de escritorio complejo ni preprocesamiento avanzado. Este trabajo demuestra que la integración de ciencia rigurosa y herramientas de visualización operativas es la clave para una gestión hídrica resiliente.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en un conjunto de embalses de aguas claras de la cuenca hidrográfica del Júcar: Alarcón, Benagéber, Contreras, María Cristina, Regajo, Sitjar y Tous. La Figura 1 muestra la distribución geográfica de las masas de agua analizadas.

2.2. Datos satelitales y datos *in situ*

La base de datos de entrenamiento se consolidó a partir de 39 campañas de campo realizadas de forma sistemática entre 2016 y 2024. Con el fin de capturar la variabilidad espacial intrínseca de cada cuerpo de agua, se establecieron entre 3 y 5 puntos de muestreo por embalse. Se obtuvieron en total 124 medidas *in situ* sincronizadas con las pasadas del satélite S2. Los datos *in situ* incluyeron Chl-a, TSM, SDD y PC. Se utilizaron imágenes S2-L2A (reflectancia en superficie), aplicando enmascarado de nubes mediante la banda QA60 y la capa de clasificación de escena (SCL) disponible en los datos de S2.

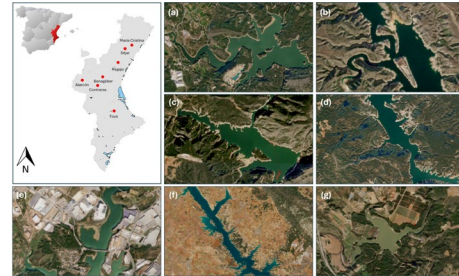


Figura 1. Localización y composición S2-RGB de los embalses de aguas claras analizadas en la Comunidad Valenciana. a) Sitjar; b) Tous; c) Benagéber; d) Contreras; e) María Cristina; f) Alarcón; g) Regajo

2.3. Desarrollo de modelos biofísicos

A partir de las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo, se extrajo la reflectancia en superficie de imágenes S2 coincidentes en una ventana temporal de 3 días. Con el objetivo de derivar modelos empíricos robustos, se evaluaron cuatro índices espectrales y combinaciones de bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano (Ecuaciones 1 a 4). La optimización de los coeficientes se realizó mediante análisis de regresión lineal simple y exponencial, priorizando aquellas combinaciones con mayor sensibilidad a las variaciones de los constituyentes ópticamente activos en aguas claras.

$$\frac{R_i}{R_j} \quad (1)$$

$$\left(\frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \right) \quad (2)$$

$$R_i \left(\frac{1}{R_j} - \frac{1}{R_k} \right) \quad (3)$$

$$R_i - \alpha \cdot [R_j - (R_k - R_j) \cdot \beta] \quad (4)$$

Donde R representa la reflectancia en la banda correspondiente (i, j, k) mientras que α y β son coeficientes de ajuste que se optimizaron minimizando el error cuadrático medio entre los datos de campo y los valores estimados por los modelos de calidad de agua.

2.4. Implementación en Copernicus Browser

Los modelos fueron traducidos a JavaScript compatible con Copernicus Browser, permitiendo su ejecución directa sobre escenas S2-L2A. Esta implementación elimina la necesidad de procesamiento previo en software especializado, facilitando la generación de productos de valor agregado generados a partir de datos de S2-L2A. La integración de los modelos de monitorización de variables de calidad del agua en la Copernicus Browser permite:

- **Democratización del acceso:** Ejecución de la herramienta operativa por perfiles no técnicos, eliminando las barreras de entrada asociadas al preprocesamiento complejo de datos satelitales.
- **Flujo de trabajo optimizado:** Aplicación directa de los modelos biofísicos sobre productos S2-L2A sin necesidad de aplicar otros correctores atmosféricos.
- **Monitoreo multivariable:** Visualización en tiempo real de cartografía temática para variables clave: Chl-a, SDD, TSM y PC.
- **Interactividad espacial:** Generación de estadísticas descriptivas para áreas de interés personalizadas.
- **Dinámica temporal:** Análisis de series históricas para la evaluación de tendencias y estacionalidad en la calidad del agua.
- **Interoperabilidad de datos:** Exportación de productos originales y mapas derivados en formato estándar GeoTIFF, facilitando su integración en Sistemas de Información Geográfica.

3. RESULTADOS

3.1. Modelos de estimación de calidad del agua

Los modelos de estimación de variables de calidad del agua se obtuvieron mediante el análisis de la concordancia entre los valores observados in situ y los datos de reflectancia de S2-L2A.

Transparencia del agua (SDD)

La profundidad del disco de Secchi se modeló mediante una función exponencial decreciente:

$$SDD(m) = 8,62 e^{-44,25 MCI_{SDD}} \quad (5)$$

Donde MCI_{SDD} se define como:

$$MCI_{SDD} = R_{560} - 1,039 [R_{665} + (R_{490} - R_{665}) 0,612] \quad (6)$$

Sólidos en suspensión (TSM)

Para TSM se obtuvo una respuesta lineal entre datos de campo y el índice espectral MCI de forma:

$$TSM(mg.L^{-1}) = 158,79 MCI_{TSM} + 1,56 \quad (7)$$

donde

$$MCI_{TSM} = R_{560} - 1,015 [R_{665} + (R_{443} - R_{490}) 0,1502] \quad (8)$$

Ficocianina (PC)

A diferencia de las variables anteriores, el modelo de estimación de ficocianina se basa en un índice de diferencia normalizada:

$$PC (\mu g.L^{-1}) = 34,08 \left(\frac{R_{560} - R_{490}}{R_{560} + R_{490}} \right) + 3,45 \quad (9)$$

Estimación de la Clorofila-a (Chl-a)

La estimación de Chl-a se abordó mediante una segmentación de los cuerpos de agua en función de su carga de material particulado inorgánico en suspensión (SPIM).

Modelización en embalses con alto SPIM

Para los embalses de Alarcón, María Cristina y Sitjar (AMS), caracterizados por concentraciones de SPIM > 2 mg.L⁻¹ y menor contenido pigmentario, el mejor ajuste se obtuvo mediante un índice tribanda definido como:

$$Chl-a_{AMS} (\mu g.L^{-1}) = -2,93 TB + 0,75 \quad (10)$$

$$\text{donde } TB = R_{665} \left(\frac{1}{R_{560}} - \frac{1}{R_{443}} \right) \quad (11)$$

Modelización en embalses con bajo SPIM

En los embalses de Benagéber, Contreras y Tous (BCT), donde predomina una mayor concentración de Chl-a y un SPIM < 2 mg.L⁻¹, se obtuvo un ajuste exponencial basado en el índice MCI definido como:

$$Chl-a_{BCT} (\mu g.L^{-1}) = 1,94 e^{6,8886 MCI_{Chl-a}} \quad (12)$$

donde

$$MCI_{Chl-a} = R_{665} - 2,097 [R_{560} + (R_{490} - R_{560}) 6,33] \quad (13)$$

3.2. Evaluación estadística de los modelos biogeoquímicos

Para evaluar la precisión y robustez de los modelos de calidad del agua, se calcularon diversos estadísticos de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) y su variante normalizada ($NRMSE$), cuyos resultados para la fase de entrenamiento de los modelos se sintetizan en la Tabla 1. Cabe destacar que el índice MCI , definido previamente (Ec. 4), actúa como el predictor principal para la mayoría de las variables. Las variables operan sobre la reflectancia en superficie (R_x) en las longitudes de onda de 443 nm (B1), 490 nm (B2), 560 nm (B3) y 665 nm (B4), de S2-MSI.

Tabla 1. Estadísticos de validación para los parámetros biogeoquímicos analizados. Las unidades corresponden a mg/L para TSM y $\mu g/L$ para PC y Chl-a, y metros (m) para SDD.

Algoritmo	n	R ²	RMSE	NRMSE (%)
Chl-a _{AMS}	19	0,77	0,33	14
Chl-a _{BCT}	37	0,50	1,18	22
SDD	74	0,70	1,46	14
TSM	54	0,79	0,93	8
PC	49	0,52	2,30	22

3.3. Interfaz operativa

Para mostrar el potencial completo de la herramienta operativa, la Figura 2 presenta una captura de pantalla del entorno Copernicus Browser. Esta visualización incluye un mapa de SDD para el embalse de Tous, superpuesto con la interfaz de programación donde se ejecuta el script en JavaScript.

3.4. Mapas temáticos y series temporales

Como caso de estudio, la Figura 3 muestra la distribución espacial de la concentración de Chl-a en los embalses de Tous, Contreras y Benagéber. Estos mapas temáticos fueron generados mediante Copernicus Browser, a partir de una escena de S2 adquirida el 19 de enero de 2025. Los mapas evidencian la heterogeneidad espacial intra-embalse y permiten validar la operatividad del sistema para la monitorización, en tiempo casi real, de la calidad del agua de los embalses del Júcar. La Figura 4 muestra la evolución temporal de las concentraciones de Chl-a y TSM en el embalse de Contreras durante un periodo de cinco años (2020–2025). Este análisis dinámico permite identificar patrones de estacionalidad con una resolución temporal sin precedentes para la gestión hidrológica regional.

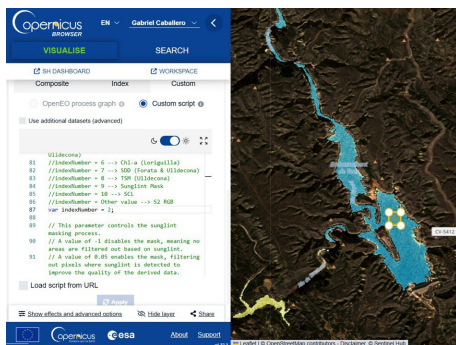


Figura 2. Interfaz operativa de Copernicus Browser. A la derecha, mapa de SDD para Tous derivado de una escena S2–L2A del 14 de enero de 2025; a la izquierda, entorno de desarrollo en JavaScript.

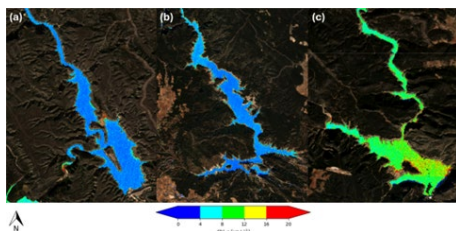


Figura 3. Mapa de concentración de Chl-a generado mediante Copernicus Browser (enero 2025). a) Tous; b) Contreras; c) Benagéber

4. DISCUSIÓN

Los resultados confirman la capacidad de S2 para la monitorización de embalses mediterráneos de aguas claras. La configuración espectral del sensor permite detectar variaciones en variables biogeoquímicas asociadas a la calidad del agua. Sin embargo, la principal aportación del estudio no reside únicamente en el ajuste estadístico, sino en la operacionalización de los modelos. La implementación en Copernicus Browser permite que gestores de la Confederación Hidrográfica del Júcar puedan generar productos de calidad del agua sin requerir procesamiento especializado. Este enfoque facilita la transición desde campañas puntuales hacia una monitorización continua, apoyando la toma de decisiones en gestión hídrica, detección temprana de eutrofización y evaluación de eventos extremos.

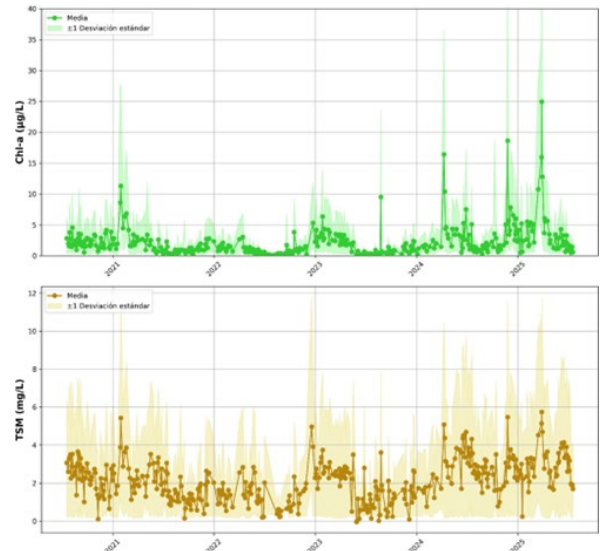


Figura 4. Serie temporal de clorofila-a en el embalse de Benagéber obtenida mediante Sentinel-2 L2A.

5. CONCLUSIONES

Los datos de reflectancia de S2–L2A permiten estimar variables biogeoquímicas de calidad del agua en embalses mediterráneos de aguas claras. Esto representa una ventaja operativa, ya que no se requiere procesar las escenas S2 de nivel L1 con otros correctores atmosféricos específicamente diseñados para aguas.

La implementación en Copernicus Browser transforma ecuaciones científicas en herramientas operativas accesibles, fortaleciendo la monitorización sistemática de masas de agua en la Comunidad Valenciana.

6. 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)”

7. REFERENCIAS

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36.

Morel, A., & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color 1. *Limnology and oceanography*, 22(4), 709-722.

Odermatt, D., Gitelson, A., Brando, V. E., & Schaepman, M. (2012). Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote sensing of environment*, 118, 116-126.

Palmer, S. C., Kutser, T., & Hunter, P. D. (2015). Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. *Remote sensing of Environment*, 157, 1-8.