

Casal Pascual, G. Productos de clorofila-a derivados del algoritmo C2X en las aguas ópticamente complejas del Golfo Ártabro (NO España)

Productos de clorofila-a derivados del algoritmo C2X en las aguas ópticamente complejas del Golfo Ártabro (NO España)

Casal Pascual, Gema ¹

¹ IEO-CSIC, España

ORCID: [Casal Pascual 0000-0002-3346-8035](https://orcid.org/0000-0002-3346-8035)

Correspondencia: gema.casal@ieo.csic.es

RESUMEN


Obtener estimaciones precisas de la calidad del agua a partir de observaciones satelitales sigue siendo especialmente difícil en las zonas costeras, donde tanto las partículas orgánicas como las inorgánicas influyen de forma significativa en las propiedades ópticas del agua. En las últimas décadas se han propuesto diferentes métodos de corrección atmosférica con productos derivados intentando abordar este desafío. No obstante, su eficacia puede variar en función de las condiciones ambientales específicas y de la localización geográfica, por lo que siguen siendo necesarios esfuerzos de validación en distintos tipos de agua para aprovechar plenamente estas herramientas. El objetivo de este estudio fue evaluar la precisión de los productos de clorofila-a derivados del procesador C2X-Nets utilizando imágenes Sentinel-2 (10 m) en el Golfo Ártabro (NO de España). La validación se llevó a cabo empleando datos de la serie temporal RADIALES, un programa de seguimiento iniciado en 1988 por el Centro Oceanográfico de A Coruña (IEO-CSIC). Se analizaron un total de 269 matchups en tres estaciones de muestreo distribuidas perpendicularmente a la costa, considerando mediciones entre 0 y 5 m de profundidad. En conjunto, el algoritmo C2X-Nets no proporcionó estimaciones fiables de clorofila-a para el conjunto completo de datos ($R^2 = 0,10$; MAE = 0,9; RMSE = 1,3; bias = -0,3). Este bajo rendimiento podría atribuirse en parte a la combinación de factores ambientales locales (por ejemplo, el oleaje frecuente) y a la resolución espacial de 10 m utilizada. Trabajos futuros explorarán el impacto de resoluciones espaciales más bajas (20 m y 60 m) en la precisión de las estimaciones de clorofila-a derivadas de C2X, así como la evaluación de algoritmos alternativos para mejorar la obtención regional de clorofila-a.

Palabras clave: *clorofila-a, aguas costeras, monitorización, calidad del agua, RADIALES*

Fecha de recepción: 3 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 3 febrero 2026

Productos de clorofila-a derivados del algoritmo C2X en las aguas ópticamente complejas del Golfo Ártabro (NO España)

Casal Pascual, Gema ⁽¹⁾

⁽¹⁾ IEO-CSIC, España,  0000-0002-3346-8035, gema.casal@ieo.csic.es.

Resumen: Obtener estimaciones precisas de la calidad del agua a partir de observaciones satelitales sigue siendo especialmente difícil en las zonas costeras, donde tanto las partículas orgánicas como las inorgánicas influyen de forma significativa en las propiedades ópticas del agua. En las últimas décadas se han propuesto diferentes métodos de corrección atmosférica con productos derivados intentando abordar este desafío. No obstante, su eficacia puede variar en función de las condiciones ambientales específicas y de la localización geográfica, por lo que siguen siendo necesarios esfuerzos de validación en distintos tipos de agua para aprovechar plenamente estas herramientas. El objetivo de este estudio fue evaluar la precisión de los productos de clorofila-a derivados del procesador C2X-Nets utilizando las bandas espectrales de 10 m de los satélites Sentinel-2 en el Golfo Ártabro (NO de España). La validación se llevó a cabo empleando datos de la serie temporal RADIALES, un programa de seguimiento iniciado en 1988 por el Centro Oceanográfico de A Coruña (IEO-CSIC). Se analizaron un total de 269 *matchups* en tres estaciones de muestreo distribuidas perpendicularmente a la costa, considerando mediciones entre 0 y 5 m de profundidad. En conjunto, el algoritmo C2X-Nets no proporcionó estimaciones fiables de clorofila-a para el conjunto completo de datos ($R^2 = 0,1$; MAE = 0,9; RMSE = 1,3; bias = -0,3). Este bajo rendimiento podría atribuirse en parte a la combinación de factores ambientales locales (por ejemplo, el oleaje frecuente) y a la resolución espacial de 10 m utilizada. Trabajos futuros explorarán el impacto de resoluciones espaciales más bajas (20 m y 60 m) en la precisión de las estimaciones de clorofila-a derivadas de C2X, así como la evaluación de algoritmos alternativos para mejorar la obtención regional de clorofila-a.

Palabras clave: clorofila-a, aguas costeras, monitorización, calidad del agua, RADIALES

Chlorophyll-a products derived from the C2X algorithm in the optically complex waters of the Golfo Ártabro (NW Spain)

Abstract: Obtaining accurate estimates of water quality from satellite observations remains particularly challenging in coastal areas, where both organic and inorganic particles significantly influence the optical properties of the water. Over recent decades, different atmospheric correction methods with derived products have been proposed in an attempt to address this challenge. However, their effectiveness may vary depending on specific environmental conditions and geographic location, and validation efforts across different water types are still necessary to fully exploit these tools. The objective of this study was to assess the accuracy of chlorophyll-a products derived from the C2X-Nets processor using the 10 m spectral bands of Sentinel-2 satellites in the Golfo Ártabro (NW Spain). Validation was carried out using data from the RADIALES time series, a monitoring program initiated in 1988 by the Oceanographic Centre of A Coruña (IEO-CSIC). A total of 269 matchups were analysed at three sampling stations distributed perpendicular to the coast, considering measurements between 0 and 5 m depth. Overall, the C2X-Nets algorithm did not provide reliable chlorophyll-a estimates for the complete dataset ($R^2 = 0.10$; MAE = 0.9; RMSE = 1.3; bias = -0.3). This poor performance may be partly attributed to the combination of local environmental factors (e.g., frequent swell) and the 10 m spatial resolution used. Future work will explore the impact of coarser spatial resolutions (20 m and 60 m) on the accuracy of C2X-derived chlorophyll-a estimates, as well as the evaluation of alternative algorithms to improve regional chlorophyll-a retrievals.

Keywords: chlorophyll-a, coastal Waters, monitoring, water quality, RADIALES

1. INTRODUCCIÓN

La clorofila-a es uno de los indicadores más relevantes del estado biogeoquímico del océano, ya que está directamente relacionada con la biomasa fitoplanctónica y la productividad primaria. La aplicación de la Directiva Marco del Agua y de la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina de la Unión Europea han supuesto una intensificación de las actividades de monitorización y control de la calidad de las aguas, tanto en los entornos costeros como dentro de los límites de la zona económica exclusiva europea. Debido a su espectro de absorción bien definido la clorofila-a puede ser detectada por sensores satelitales (Muñoz-Miranda y Iñiguez-Moreno, 2023). Uno de los programas de Observación de la Tierra más reciente y ambicioso, el Programa Copérnico, incluye la misión Sentinel-2 de gran relevancia en entornos costeros. Actualmente esta cuenta con tres satélites en órbita: Sentinel-2A (lanzado en 2015), Sentinel-2B (lanzado en 2017) y Sentinel-2C (lanzado en 2024).

La misión Sentinel-2 incorpora un sensor multiespectral de alta resolución con 13 bandas espectrales y un amplio campo de visión de 290 km. Los satélites Sentinel-2 recogen de forma sistemática imágenes multiespectrales globales hasta 20 km de la costa. Presentan un ciclo de revisita de 5 días en el ecuador y de 2–3 días en latitudes más altas, y ofrecen resoluciones espaciales de 10 m, 20 m y 60 m (Szantoi y Strobl, 2019).

El objetivo de este estudio es evaluar la precisión de los productos de clorofila-a derivados mediante el procesador Case 2 Regional CoastColour (C2X-Nets) (Brockmann *et al.*, 2016), implementado en la plataforma Sentinel Application Platform (SNAP), utilizando las bandas espectrales de 10 m de los satélites Sentinel-2.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo corresponde al Golfo Ártabro, ubicado en el sector noroccidental de la costa de Galicia (Figura 1). Este sistema costero comprende las rías de A Coruña, Ares-Betanzos y Ferrol, y está caracterizado por una dinámica oceanográfica compleja, condicionada por la interacción entre las corrientes atlánticas, los aportes fluviales y los procesos de afloramiento costero.

2.2. Programa RADIALES

El proyecto RADIALES del Instituto Español de Oceanografía (IEO) es un programa de muestreo oceanográfico mensual en el norte de España que fue aprobado en 1993 pero sus series temporales se remontan a 1988. Actualmente, RADIALES incluye cinco transectos costeros a lo largo del norte de España: Vigo, A Coruña, Cudillero, Gijón y Santander. Cada estación es visitada al menos de forma mensual. El muestreo comprende un amplio conjunto de mediciones físicas, químicas y biológicas, incluida la concentración de clorofila-a. En este estudio se utilizaron únicamente los datos correspondientes al RADIAL de A Coruña (Figura 1).

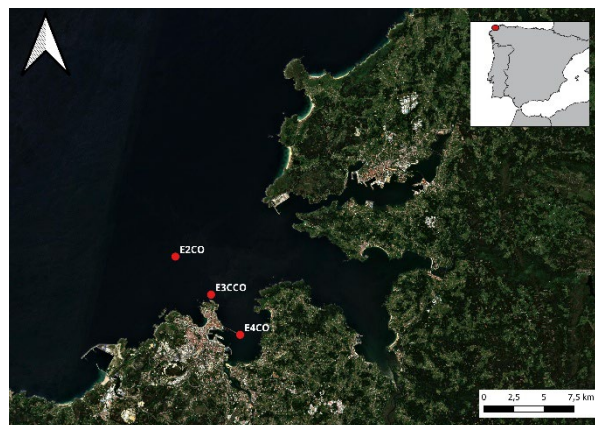


Figura 1. Área de estudio y estaciones RADIALES utilizadas (E2CO, E3CCO, E4CO).

Durante las campañas RADIALES, las muestras de agua se recolectaron mediante botellas Niskin acopladas a una roseta oceanográfica equipada con sensores CTD. Las muestras para la determinación de clorofila-a se obtuvieron en la capa superficial (0–5 m) y en profundidades adicionales seleccionadas en función de la estratificación de la columna de agua. La filtración se realizó *in situ* o inmediatamente tras la recogida, utilizando filtros de fibra de vidrio (Whatman GF/F, 25 mm), con volúmenes filtrados comprendidos entre 100 ml y 250 ml (com. pers.).

La concentración de clorofila-a se determinó mediante extracción en acetona al 90 % durante 24 h a -20 °C y en ausencia de luz, seguida de la medición fluorométrica con un equipo previamente calibrado (Bode *et al.*, 2011). El procedimiento analítico se ajustó a los protocolos del Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) y del SCOR Working Group 78, garantizando la calidad y comparabilidad de los datos para su posterior validación con productos satelitales en ambientes costeros.

2.3. Análisis de las imágenes Sentinel-2

Para la estimación de la concentración de clorofila-a a partir de observaciones remotas se emplearon imágenes multiespectrales adquiridas por los satélites de la misión Sentinel-2 del programa Copérnico. Los productos utilizados corresponden a reflectancia sobre la atmósfera (Level-1C) y fueron descargados desde la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem. Se seleccionaron escenas comprendidas entre los años 2015 y 2024, priorizando aquellas fechas próximas a las campañas del programa RADIALES para las que se disponía de datos *in situ*.

La selección de imágenes incluyó una inspección visual exhaustiva con el fin de excluir escenas afectadas por nubosidad, bruma o niebla sobre el área de estudio, ya que estas condiciones pueden introducir errores significativos en la estimación espectral de los constituyentes ópticamente activos del agua. Únicamente se conservaron aquellas imágenes que presentaban condiciones atmosféricas favorables sobre el Golfo Ártabro.

El preprocesado de las imágenes se realizó mediante el software SNAP (Sentinel Application Platform),

desarrollado por la Agencia Espacial Europea. El flujo de trabajo incluyó el remuestreo de todas las bandas espectrales a una resolución espacial común de 10 m, así como el recorte de las escenas al área de estudio con el objetivo de optimizar el procesamiento y focalizar el análisis.

La corrección atmosférica se llevó a cabo mediante el procesador Case 2 Regional Coast Colour, en su versión extendida C2X, integrado en SNAP (Brockmann *et al.*, 2016). Este procesador fue seleccionado por su idoneidad en aguas costeras ópticamente complejas, caracterizadas por la presencia simultánea de materia orgánica disuelta y partículas en suspensión, una condición habitual en el Golfo Ártabro. Para la ejecución del modelo se emplearon valores estándar de presión atmosférica y se ajustó la temperatura del agua en función del mes de adquisición de cada imagen, utilizando climatologías mensuales regionales. El producto resultante consistió en mapas raster de concentración de clorofila-a expresados en mg/m^3 .

Con el fin de reducir el ruido espacial y atenuar posibles artefactos asociados a errores instrumentales o atmosféricos, se aplicó un filtrado espacial de tipo low-pass mediante una ventana de 3×3 píxeles. Este procedimiento suaviza las variaciones locales sin alterar los patrones espaciales dominantes de la distribución de clorofila-a (Figura 2).

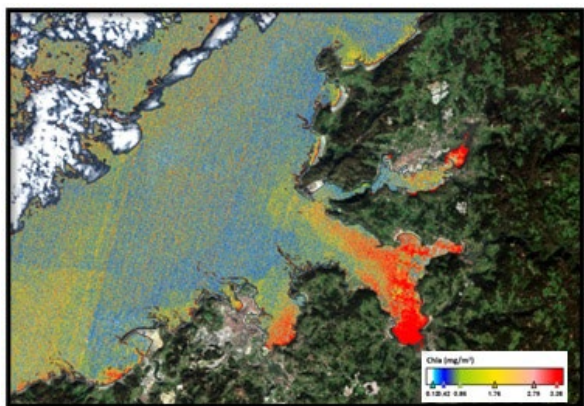


Figura 2. Concentración de clorofila-a derivada del procesador C2X-Nets una vez aplicado el filtro low-pass (3×3).

La validación de las estimaciones satelitales de clorofila-a se realizó mediante su comparación con datos *in situ* procedentes del programa RADIALES del IEO-CSIC. Para ello, se extrajeron los valores de clorofila-a derivados de las imágenes Sentinel-2 en las coordenadas geográficas correspondientes a las estaciones seleccionadas. Se estableció una ventana temporal de ± 3 días entre la fecha de adquisición de la imagen y el muestreo *in situ*, con el objetivo de maximizar el número de coincidencias válidas y minimizar los desfases temporales, asumiendo una variabilidad ambiental limitada dentro de dicho intervalo.

Los valores emparejados de clorofila-a satelital e *in situ* se emplearon para evaluar el rendimiento del método mediante el cálculo de métricas estadísticas estándar,

incluyendo el error cuadrático medio (RMSE), el error medio absoluto (MAE) y el sesgo (Bias), permitiendo así cuantificar tanto la precisión como posibles tendencias sistemáticas de sobreestimación o infraestimación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación entre las concentraciones de clorofila-a estimadas a partir de imágenes Sentinel-2 y las medidas *in situ* evidenció una concordancia limitada tanto en el conjunto de datos como en las tres estaciones analizadas (E2CO, E3CCO y E4CO), como indican los bajos valores de R^2 y los errores relativamente elevados (MAE, RMSE y Bias). En conjunto, los resultados sugieren que el procesador empleado reproduce de forma insuficiente la variabilidad observada en las concentraciones medidas *in situ* (Figura 3a).

En la estación E2CO, que presentó el mayor número de coincidencias ($n = 142$), se observó una relación positiva débil entre ambos conjuntos de datos ($R^2 = 0,153$), acompañada de una elevada dispersión, especialmente para concentraciones *in situ* superiores a $2 \text{ mg}/\text{m}^3$. El sesgo medio fue reducido (Bias = $-0,051 \text{ mg}/\text{m}^3$), indicando una tendencia general a la subestimación de la clorofila-a satelital respecto a los valores medidos.

En la estación E3CCO, el número de coincidencias fue considerablemente menor ($n = 23$), lo que limita la robustez estadística del ajuste. No obstante, los resultados fueron consistentes con los observados en E2CO, mostrando una relación igualmente débil ($R^2 = 0,139$) y una subestimación más acusada de la clorofila-a por parte del producto satelital (Bias = $-0,323 \text{ mg}/\text{m}^3$). Los valores de error (MAE y RMSE) fueron comparables a los de E2CO, lo que sugiere un comportamiento similar entre ambas estaciones, pese a las diferencias en tamaño muestral.

La estación E4CO presentó el peor ajuste entre ambos conjuntos de datos, con un coeficiente de determinación prácticamente nulo ($R^2 = 0,006$) y el mayor sesgo negativo (Bias = $-0,535 \text{ mg}/\text{m}^3$), lo que evidencia una subestimación sistemática más pronunciada. Estos datos indican una escasa sensibilidad del algoritmo aplicado a la variabilidad real de la clorofila-a observada *in situ* en esta localización.

La restricción del análisis a coincidencias temporales exactas entre el muestreo *in situ* y el paso del satélite (Figura 3b), así como a observaciones obtenidas a profundidades $\leq 1 \text{ m}$ (Figura 3c), no produjo mejoras sustanciales en el ajuste, lo que indica que las discrepancias observadas no pueden atribuirse exclusivamente ni al desfase temporal entre ambas fuentes de datos ni a diferencias asociadas a la profundidad de muestreo.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto las dificultades asociadas a la estimación satelital de clorofila-a en ambientes costeros ópticamente complejos como el Golfo Ártabro. La dispersión observada y la tendencia general a la subestimación pueden estar relacionadas con la influencia simultánea de materia orgánica disuelta coloreada, partículas en suspensión y aportes continentales, que alteran la señal

espectral del agua y reducen la eficacia de los algoritmos bio-ópticos de carácter general. Estas limitaciones parecen ser especialmente relevantes en la estación E4CO, cuyas características locales, incluida su proximidad al dique de abrigo y a la dársena, podrían favorecer una mayor variabilidad espacial y condiciones bio-ópticas diferenciadas.

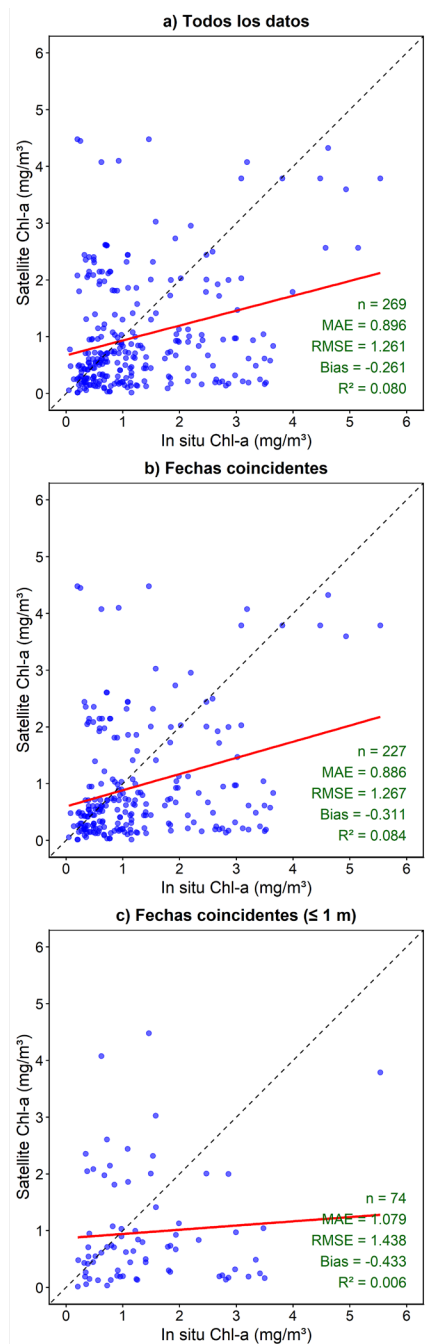


Figura 3. Gráficos de dispersión entre los productos derivados de satélite y los datos *in situ* del programa RADIALES.

Asimismo, el bajo rendimiento del procesador C2X-Nets podría estar influido, al menos en parte, por factores ambientales locales y por la resolución espacial de 10 m empleada en este análisis. En este contexto, trabajos

futuros evaluarán el efecto de resoluciones espaciales más bajas (20 m y 60 m) sobre la precisión de las estimaciones de clorofila-a derivadas de C2X-Nets, así como la aplicación de algoritmos alternativos con mayor potencial de ajuste a escala regional.

4. CONCLUSIONES

Aunque el procesador C2X-Nets permite identificar parcialmente algunos patrones generales, la dispersión de los datos y la tendencia a la subestimación ponen de manifiesto la necesidad de mejorar su ajuste para la extracción de concentraciones de clorofila-a en ambientes ópticamente complejos como los presentes en el Golfo Ártabro.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de un contrato del Programa Ramón y Cajal (RYC2023-044898-I) financiado por el MCIU/AEI/10.13039/501100011033 y el FSE+, así como por dos programas de formación de grado de la Universidade da Coruña y la Universidade de Vigo. El programa RADIALES está financiado por ESMARES3 (Estrategias Marinas) y FEMPA.

6. REFERENCIAS

Brockmann, C., R. Doerffer, M. Peters, K. Stelzer, S. Embacher, Ruescas, A. (2016). Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters. In *Proceedings of the Living Planet Symposium 2016*, Prague, Czech Republic, 9-13 May 2016.

Bode, A, Anadón, R., Morán, X.A.G., Nogueira, E., Teira, E., Varela, M. (2011). *Climate Research*, 48 (2-3), 293-305. <http://dx.doi.org/10.3354/cr00935>

Muñoz-Miranda, L.A., Iñiguez-Moreno, M. (2023). An extensive review of marine pigments: sources, biotechnological applications, and sustainability. *Aquatic Sciences*, 85, 68. <https://doi.org/10.1007/s00027-023-00966-8>

Szantoi, Z., Strobl, P. (2019). Copernicus Sentinel-2 Calibration and Validation. *European Journal of Remote Sensing* 52 (1), 253-255. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1582840>

Valdés, L., Bode, A., Latasa, M., Enrique, N., Somavilla, R., Varela, M.M., González-Pola, C., Casas, G. (2021). Three decades of continuous ocean observations in North Atlantic Spanish Waters: The RADIALES time series Project, context, achievements and challenges. *Progress in Oceanography*, 198, 102671. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102671>