

Pubill Fondevila, D.; Gené Skrabec, B.; Huerta i Lluch, R.; Angelats Company, E. Impacto de la turbidez y la clorofila-a en la batimetría derivada de Sentinel-2: análisis en el litoral de Barcelona

Impacto de la turbidez y la clorofila-a en la batimetría derivada de Sentinel-2: análisis en el litoral de Barcelona

Pubill Fondevila, David ¹ Gené Skrabec, Bernat ² Huerta i Lluch, Roger ² Angelats Company, Eduard ¹

¹ Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), 08860 Castelldefels, España

² SPASCAT Technologies S.L., 08320 El Masnou, España

ORCID: Pubill Fondevila 0000-0002-9086-4907 Gené Skrabec 0009-0007-0589-169X

Huerta i Lluch 0000-0003-2094-5485 Angelats Company 0000-0001-7321-4825

Correspondencia: david.pubill@cttc.es bernat.gene@spascats.com roger.huerta@spascats.com eduard.angelats@cttc.es

RESUMEN

La batimetría derivada por satélite a partir de imágenes multiespectrales constituye una alternativa escalable y rentable frente a los métodos tradicionales, especialmente en aguas someras. Este estudio presenta un flujo de trabajo para generar batimetría robusta y precisa a partir de imágenes Sentinel-2 en nueve zonas costeras del Área Metropolitana de Barcelona. Para ello, a partir de las imágenes corregidas atmosféricamente y libres de reflejo especular se derivaron las variables ópticas empleadas en el análisis: reflectancias visibles (R, G, B), las ratios espectrales BG (B2/B3) y BR (B2/B4), así como los productos bio-ópticos clorofila-a (CHL) y turbidez (TUR). Además, las variables espectrales se filtraron mediante una ventana 3×3 para reducir ruido subpíxel, mientras que CHL y TUR se emplearon en su resolución original. En cuanto a los resultados, los modelos basados únicamente en reflectancias presentan un MAE de 0.714m, que disminuye al incorporar la variable TUR (MAE de 0.550m). Por su parte, la ratio BG disminuye sustancialmente el error (MAE de 0.402m), y la combinación de BG y BR con CHL y TUR proporciona el mejor resultado global (MAE de 0.392m). Esto indica que BG actúa como predictor clave y que CHL y TUR aportan información complementaria en entornos ópticamente complejos. En conjunto, estos resultados demuestran que la integración de las ratios espectrales y productos bio-ópticos mediante regresión basada en redes neuronales permite obtener batimetrías más precisas y robustas en diversos entornos costeros.


Palabras clave: Batimetría derivada por satélite, Teledetección, Sentinel-2


Fecha de recepción: 6 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 6 febrero 2026

Impacto de la turbidez y la clorofila-a en la batimetría derivada de Sentinel-2: análisis en el litoral de Barcelona


Pubill Fondevila, David ⁽¹⁾, Gené Skrabec, Bernat ⁽²⁾, Huerta i Lluch, Roger ⁽²⁾, Angelats Company, Eduard ⁽¹⁾


⁽¹⁾ Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), Castelldefels, España.

 0000-0002-9086-4907, david.pubill@cttc.es

 0000-0001-7321-4825, eduard.angelats@cttc.es

⁽²⁾ SPASCAT Technologies S.L., España.

 0009-0007-0589-169X, bernat.gene@spascat.com

 0000-0003-2094-5485, roger.huerta@spascat.com

Resumen: La batimetría derivada por satélite a partir de imágenes multiespectrales constituye una alternativa escalable y rentable frente a los métodos tradicionales, especialmente en aguas someras. Este estudio presenta un flujo de trabajo para generar batimetría robusta y precisa a partir de imágenes Sentinel-2 en nueve zonas costeras del Área Metropolitana de Barcelona. Para ello, a partir de las imágenes corregidas atmosféricamente y libres de reflejo especular se derivaron las variables ópticas empleadas en el análisis: reflectancias visibles (R, G, B), las ratios espectrales BG (B2/B3) y BR (B2/B4), así como los productos bio-ópticos clorofila-a (CHL) y turbidez (TUR). Además, las variables espectrales se filtraron mediante una ventana 3×3 para reducir ruido subpíxel, mientras que CHL y TUR se emplearon en su resolución original. En cuanto a los resultados, los modelos basados únicamente en reflectancias presentan un MAE de 0.714m, que disminuye al incorporar la variable TUR (MAE de 0.550m). Por su parte, la ratio BG disminuye sustancialmente el error (MAE de 0.402m), y la combinación de BG y BR con CHL y TUR proporciona el mejor resultado global (MAE de 0.392m). Esto indica que BG actúa como predictor clave y que CHL y TUR aportan información complementaria en entornos ópticamente complejos. En conjunto, estos resultados demuestran que la integración de las ratios espectrales y productos bio-ópticos mediante regresión basada en redes neuronales permite obtener batimetrías más precisas y robustas en diversos entornos costeros.

Palabras clave: Batimetría derivada por satélite, Teledetección, Sentinel-2

Impact of turbidity and chlorophyll-a on Sentinel-2 derived bathymetry: a study along the Barcelona coastal area

Abstract: *Satellite-derived bathymetry from multispectral imagery presents a scalable and cost-effective alternative to traditional methods, especially in shallow waters. This study presents a workflow to generate robust and accurate bathymetry from Sentinel-2 imagery across nine coastal areas of the Barcelona Metropolitan Area. To this end, optically relevant variables were derived from atmospherically corrected and sunglint-free images: visible reflectances (R, G, B), the spectral ratios BG (B2/B3) and BR (B2/B4), as well as the bio-optical products chlorophyll-a (CHL) and turbidity (TUR). In addition, the spectral variables were filtered using a 3×3 window to reduce sub-pixel noise, whereas CHL and TUR were used at their original resolution. Regarding the results, models based only on reflectances show a MAE of 0.714m, which decreases when incorporating TUR (MAE of 0.550 m). The BG ratio further reduces the error (MAE of 0.402m), and the combination of BG and BR with CHL and TUR provides the best overall result (MAE of 0.392m). This indicates that BG acts as the key predictor and that CHL and TUR provide complementary information in optically complex environments. Overall, these results demonstrate that integrating spectral ratios and bio-optical products with neural network-based regression enables more accurate and robust bathymetry across diverse coastal areas.*

Keywords: *Satellite-Derived Bathymetry, Remote Sensing, Sentinel-2*

1. INTRODUCCIÓN

La batimetría es fundamental para caracterizar la topografía submarina y su evolución, con aplicaciones en navegación, gestión del riesgo costero y restauración de hábitats. Entre las técnicas empleadas destacan los métodos ópticos (batimetría derivada a partir de imágenes multispectrales y LiDAR batimétrico) y los hidroacústicos (SONAR multihaz), cuya aplicabilidad depende principalmente de la profundidad y de las condiciones ópticas del agua. En general, los métodos ópticos resultan eficaces en aguas claras y someras, con profundidades que pueden alcanzar hasta 60 m en el caso del LiDAR, mientras que los sistemas hidroacústicos ofrecen un mejor rendimiento en profundidades medias y grandes (20–500 m), aunque requieren mayores recursos (Mandlbürger, 2022).

La batimetría derivada por satélite (SDB) ha ganado relevancia por su escalabilidad y rentabilidad. Entre los métodos semiempíricos destacan el modelo lineal de bandas (Lyzenga, 2006) y el de ratio de bandas con transformación logarítmica (Stumpf, 2003), aplicados a imágenes ópticas preprocesadas, como las de Sentinel-2 (S2), y calibrados con datos de referencia. Avances recientes han adaptado estos enfoques a aguas turbias y a regiones del Mediterráneo occidental (Caballero, 2023; Viaña-Borja, 2023), aunque no integran explícitamente parámetros bio-ópticos, como la clorofila-a (CHL) o la turbidez (TUR), como predictoras que mejoren la precisión del modelo. Los enfoques basados en la física (Casal, 2020) modelan las propiedades ópticas de la columna de agua y evitan mediciones *in situ*, pero dependen de parametrizaciones fiables y pueden degradarse en aguas ópticamente complejas.

El aprendizaje automático ofrece otra vía prometedora con modelos como *Random Forest* o redes neuronales entrenadas con datos de referencia (Eugenio, 2021). Aunque no requieren calibraciones adicionales, su transferibilidad entre regiones sigue siendo limitada (Viaña-Borja, 2023). Asimismo, se han explorado alternativas basadas en la propagación de olas (Bergsma, 2019), aunque este enfoque es más complejo y menos compatible con flujos de trabajo combinados de Observación de la Tierra (EO) y vehículos de superficie no tripulados (USV). En este contexto, el proyecto *Waterbody Assessment and Verification fusing Earth observation and Seabot Surveying (WAVESS)*, parte del programa ESA Phi-LabNET Spain, surge como respuesta a estas limitaciones.

WAVESS aborda un desafío clave en la monitorización costera: desarrollar una solución escalable y rentable que combine datos de EO con mediciones de referencia en tiempo real. Mientras que los métodos tradicionales requieren campañas de campo extensas, la innovación de WAVESS radica en la fusión de imágenes satelitales con datos obtenidos por USVs. En este contexto, este estudio tiene como objetivo evaluar el uso de CHL y TUR como herramientas para mejorar la precisión de la SDB. Para ello, se emplean imágenes de S2 corregidas con ACOLITE. El análisis se centra en determinar si la integración de los parámetros bio-ópticos, junto con reflectancias corregidas y ratios espectrales, podría

contribuir a reducir la incertidumbre en las estimaciones, especialmente en entornos ópticamente complejos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de interés abarca los tramos litorales de Sitges, Castelldefels, Gavà, Viladecans, Barcelona, Sant Adrià, Badalona, Montgat y El Masnou (Fig. 1). Las nueve zonas bajo estudio presentan extensiones que oscilan entre 1 y 5 km de longitud y se extienden hasta 2 km mar adentro, alcanzando profundidades máximas de 15 m. Asimismo, se trata de zonas batimétricamente activas debido a la influencia de temporales marítimos. Como datos de referencia se emplean los modelos topobatimétricos de 2021-2022 para estas zonas, disponibles en el Geoportal de Cartografía del Área Metropolitana de Barcelona (AMB, 2025), donde únicamente se especifican el mes y año de adquisición.

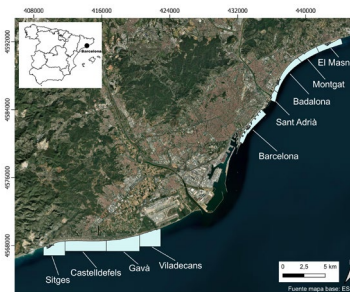


Figura 1. Zonas de estudio en el litoral de Barcelona

2.2. Datos Sentinel-2

Para cada zona de estudio se seleccionaron imágenes S2 sin nubosidad ni sombras de nubes, y coincidentes en mes y año con los modelos topobatimétricos, lo que implica posibles diferencias de varios días entre ambos conjuntos de datos. Asimismo, se comprobó la ausencia de eventos meteorológicos relevantes durante los días analizados. En total se descargaron seis imágenes S2 L1C (S2A/B-MSI) del servidor de la ESA (<https://dataspace.copernicus.eu/>), que contienen las 13 bandas espectrales del sensor MSI con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m.

La corrección atmosférica y de reflejo especular de las imágenes descargadas se realizó mediante el procesador ACOLITE, versión 20250402.0 (<https://github.com/acolite/acolite>). Además, para cada imagen se generaron los productos de CHL y TUR preprogramados. Entre las distintas opciones posibles se seleccionó OC3 (O'Reilly, 2019) para la estimación de CHL y Dogliotti_2015 (Dogliotti, 2015) para la estimación de TUR, por ser los algoritmos más robustos y ampliamente validados en aguas costeras someras, proporcionando estimaciones estables sin necesidad de calibraciones regionales adicionales.

2.3. Procesamiento de imágenes

Para estimar la batimetría de las zonas de estudio se desarrolló un flujo de procesado en *Python* que combinó la batimetría de referencia con imágenes S2 corregidas con ACOLITE. El procedimiento aplicó máscaras de

agua específicas para cada playa y generó un conjunto de variables ópticas a partir de las bandas visibles, incluyendo las reflectancias (R, G, B) y las ratios BG (B2/B3) y BR (B2/B4). Dichas variables se suavizaron mediante una ventana de 3×3 píxeles, calculando la media local para reducir el ruido asociado al oleaje, la variabilidad subpixel y la heterogeneidad del fondo. Un análisis preliminar confirmó que este filtrado mejoraba el rendimiento de las reflectancias y de las ratios. En cambio, para las variables CHL y TUR no se utilizó esta técnica, dado que el suavizado adicional no aportaba mejoras y, en algunos casos, degradaba los resultados.

A partir de estas variables se generaron los puntos de entrenamiento y validación mediante trayectorias simuladas que replicaban una campaña batimétrica real, con transectos perpendiculares a la costa separados 250 m. Con estas muestras se entrenó un modelo de regresión basado en una red neuronal *Multi-layer Perceptron* (MLP), que modeló la relación entre las variables ópticas y la profundidad. Finalmente, el sistema calculó métricas de evaluación como el *Mean Absolute Error* (MAE), los percentiles 95 y 99 (P95, P99) y el *Median Absolute Error* (MedianAE), lo que permitió comparar de forma consistente el rendimiento entre las distintas combinaciones de variables de entrada. Para cada tramo litoral se realizaron diez experimentos con el objetivo de evaluar la estabilidad del algoritmo y detectar posibles valores atípicos. A partir de estos ensayos se calculó la media de las métricas en cada tramo, generando un conjunto de indicadores por ubicación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados en este trabajo se basan en la media agregada de todos los tramos, lo que permite comparar de forma consistente el rendimiento entre los métodos evaluados. Para analizar la contribución de cada grupo de predictores, los resultados se organizan en tres bloques, presentados en las Tablas 1–3.

Los resultados muestran tendencias coherentes entre los distintos bloques de predictores. En primer lugar, los modelos basados únicamente en reflectancias (Tabla 1) presentan un MAE de 0.714m y un MedianAE de 0.512m. Tanto la incorporación de CHL como de TUR mejora el rendimiento, aunque la combinación de ambas alcanza el mejor resultado dentro de este bloque (MAE de 0.516m). En segundo lugar, en la Tabla 2 se incorpora la ratio BG, lo que reduce el error hasta un MAE de 0.402m y un MedianAE de 0.294m, confirmando su papel relevante como predictor óptico asociado a la profundidad. Sin embargo, añadir CHL degrada el rendimiento (MAE de 0.440m), mientras que incorporar TUR mantiene prácticamente los resultados obtenidos con solo BG (MAE de 0.402m), lo que sugiere un aporte redundante. Este patrón es coherente con las correlaciones obtenidas, ya que BG y BR muestran una correlación alta con TUR ($r \approx 0.9$), mientras que CHL presenta una correlación algo menor ($r \approx 0.8$), lo que sugiere una contribución más complementaria. En este bloque, la combinación BG+CHL+TUR produce una ligera mejora (MAE de 0.394m). Por último, en el tercer bloque (Tabla 3), la incorporación conjunta de BG y BR no mejora respecto a RGB_BG (MAE de 0.415m y

MedianAE de 0.297m). En este caso, CHL sí aporta información útil y reduce el error a un MAE de 0.394m, mientras que TUR empeora el rendimiento (MAE de 0.419m). La combinación CHL+TUR junto con ambas ratios alcanza el mejor resultado global (MAE de 0.392m, P95 de 1.108m, P99 de 1.770m y MedianAE de 0.287m), lo que indica que las variables bio-ópticas pueden reforzar el modelo.

Tabla 1. Resultados modelos RGB con CHL y TUR

| Modelo | MAE | P95 | P99 | MedianAE |
|-----------------|-------|-------|-------|----------|
| RGB | 0.714 | 2.051 | 3.244 | 0.512 |
| RGB + CHL | 0.688 | 1.988 | 3.126 | 0.491 |
| RGB + TUR | 0.550 | 1.619 | 2.666 | 0.383 |
| RGB + CHL + TUR | 0.516 | 1.512 | 2.458 | 0.361 |

Tabla 2. Resultados modelos RGB+BG con CHL y TUR

| Modelo | MAE | P95 | P99 | MedianAE |
|--------------------|-------|-------|-------|----------|
| RGB_BG | 0.402 | 1.143 | 1.807 | 0.294 |
| RGB_BG + CHL | 0.440 | 1.295 | 2.256 | 0.311 |
| RGB_BG + TUR | 0.402 | 1.123 | 1.768 | 0.300 |
| RGB_BG + CHL + TUR | 0.394 | 1.113 | 1.766 | 0.289 |

Tabla 3. Resultados modelos RGB+BG+BR con CHL y TUR

| Modelo | MAE | P95 | P99 | MedianAE |
|-----------------------|-------|-------|-------|----------|
| RGB_BG_BR | 0.415 | 1.176 | 1.969 | 0.297 |
| RGB_BG_BR + CHL | 0.394 | 1.110 | 1.762 | 0.290 |
| RGB_BG_BR + TUR | 0.419 | 1.174 | 1.817 | 0.310 |
| RGB_BG_BR + CHL + TUR | 0.392 | 1.108 | 1.770 | 0.287 |

Aunque la ratio BG es el predictor más informativo para estimar la profundidad, los resultados muestran que las variables bio-ópticas CHL y TUR pueden aportar valor añadido en ciertos escenarios. Su incorporación permite representar variaciones en la columna de agua que las ratios espectrales no capturan por sí solas, especialmente cuando cambian las condiciones ópticas. En las zonas de interés, la TUR media es de 2.25 NTU y la CHL media de 1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores propios de aguas relativamente claras, lo que explica que su aporte sea moderado en este estudio. No obstante, en regiones con mayor CHL o TUR, donde la variabilidad bio-óptica influya más en la atenuación lumínica, es previsible que estas variables tengan un peso más significativo y mejoren la estimación batimétrica. En síntesis, aunque BG constituye la base más sólida, CHL y TUR pueden reforzar el modelo en situaciones con mayor complejidad bio-óptica.

Para ilustrar esta dinámica y mostrar de forma intuitiva cómo varía el error a lo largo del perfil batimétrico, la Figura 2 presenta un ejemplo representativo de la playa de Gavà. Los diagramas de barras comparan la evolución del error absoluto medio por tramos de profundidad para el modelo basado únicamente en RGB y para la configuración RGB_BG_BR+CHL+TUR. El

modelo RGB presenta errores más elevados, especialmente a partir de los -5 m, mientras que la incorporación de las ratios junto con CHL y TUR reduce el error y estabiliza las predicciones a lo largo del perfil. Por su parte, el mapa de error absoluto del modelo final RGB_BG_BR+CHL+TUR muestra errores generalmente bajos en la mayor parte de la zona y un incremento progresivo hacia los sectores más profundos.

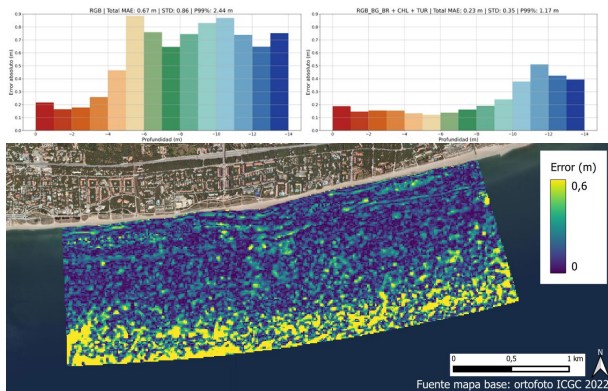


Figura 2: Error absoluto medio por tramos de profundidad en Gavà para los modelos RGB y RGB_BG_BR+CHL+TUR, junto a la distribución espacial del error absoluto del modelo final.

4. CONCLUSIONES

Los resultados parecen indicar que la selección de predictores ópticos es clave para la calidad de la batimetría derivada de S2. Aunque las reflectancias RGB ofrecen una primera aproximación, la incorporación de TUR mejora el ajuste y la ratio BG supone el avance más significativo, reduciendo el error en más de un 40% y consolidándose como el predictor más robusto en aguas someras. La combinación de BG y BR no mejora el rendimiento por sí sola, pero sí cuando se integra con CHL, que contribuye a estabilizar el modelo en condiciones ópticamente más complejas. El mejor rendimiento global de las métricas calculadas se obtiene al combinar BG, BR, CHL y TUR, lo que demuestra que las variables bio-ópticas potencian las ratios espectrales. En definitiva, la incorporación de estos predictores optimiza el rendimiento de los modelos SDB y permite obtener estimaciones batimétricas aparentemente más precisas. No obstante, la aplicación futura de este flujo de trabajo requiere una validación en más escenarios costeros para evaluar su comportamiento ante distintas tipologías de fondo y condiciones variables de CHL y TUR, por ejemplo, asociadas a eventos meteorológicos extremos. Además, podrían considerarse otras bandas, como la Banda 1, citada en otros trabajos recientes (Roca-Mora, 2026).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la ESA Phi-Lab NET Spain en el marco del proyecto WAVESS (ref. IEEC/98/2025).

6. REFERENCIAS

AMB, Área Metropolitana de Barcelona. Geoportal de Cartografía. Última actualización setiembre 2025.

<https://geoportalcartografia.amb.cat/AppGeoportalCartografia2/index.html>

- Bergsma, E.W.J., Almar, R., Maisongrande, P., 2019. Radon-augmented Sentinel-2 satellite imagery to derive wave-patterns and regional bathymetry. *Remote Sensing*, 11. <https://doi.org/10.3390/rs11161918>
- Caballero, I., Stumpf, R., 2023. Confronting turbidity, the major challenge for satellite-derived coastal bathymetry. *Science of the Total Environment*, 870. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161898>
- Casal, G., et al., 2020. Satellite-derived bathymetry in optically complex waters using a model inversion approach and Sentinel-2 data. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 241, 106814. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106814>
- Dogliotti, A. I., et al., 2015. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>
- Eugenio, F., Marcello, J., Mederos-Barrera, A., Marqués, F., 2021. High-Resolution Satellite Bathymetry Mapping: Regression and Machine Learning-Based Approaches. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing* 60:1–14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3135462>
- Lyzenga, D.R., Malinas, N.P., Tanis, F. J., 2006. Multispectral Bathymetry Using a Simple Physically Based Algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44: 2251–2259. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872909>
- Mandlburger, G., 2022. A review of active and passive optical methods in hydrography. *The International Hydrographic Review*, 28, pp. 8-52. <https://doi.org/10.58440/ihr-28-a15>
- O'Reilly, J.E., & Werdell, P.J., 2019. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors – OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment*, 229, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>
- Stumpf R.P., Holderied K., Sinclair M., 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, *Limnology and Oceanography*, 1, part, 2. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- Viaña-Borja, S.P., Fernández-Mora, A., Stumpf, R.P., Navarro, G., Caballero, I, 2023. Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 120, 103328. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103328>
- Roca-Mora, M., et al., 2026. Blending PlanetScope and Sentinel-2 imagery to assess subtidal seagrass changes in turbid waters. *Marine Pollution Bulletin*, 225, 119228. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119228>