

Haro, S.; Caballero, I.; Navarro, G. Aplicación de código abierto basada en Sentinel-2 para el seguimiento de biomasa fotosintética intermareal: Arribazones del alga parda invasora *Rugulopteryx okamurae*

Aplicación de código abierto basada en Sentinel-2 para el seguimiento de biomasa fotosintética intermareal: Arribazones del alga parda invasora *Rugulopteryx okamurae*

Haro, Sara ¹ Caballero, Isabel ¹ Navarro, Gabriel ¹

¹ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, España

ORCID: Haro 0000-0002-0026-102X Caballero 0000-0001-7485-0989 Navarro 0000-0002-8919-0060

Correspondencia: sara.haro@csic.es isabel.caballero@csic.es gabriel.navarro@csic.es

RESUMEN

El desarrollo de herramientas que acerquen la teledetección a sus potenciales usuarios constituye un reto clave para mejorar la monitorización ambiental. En este trabajo se presenta una aplicación de código abierto desarrollada en Python que integra la API de Google Earth Engine para la monitorización sistemática de biomasa fotosintética intermareal mediante imágenes Sentinel-2 desde 2017 hasta la actualidad. Los parámetros de entrada se han adaptado al seguimiento de arribazones del alga parda invasora *Rugulopteryx okamurae*, con el objetivo de analizar sus patrones espaciales y temporales de acumulación en playas. Desde 2015, *R. okamurae* se ha expandido rápidamente por el suroeste de Europa y el noroeste de África, generando importantes impactos ecológicos y socioeconómicos asociados a la acumulación masiva de biomasa en zonas costeras. El sistema automatiza la selección de imágenes libres de nubes según umbrales definidos por el usuario e incorpora la detección de condiciones de marea baja mediante el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI). Para la monitorización de la biomasa fotosintética durante la marea baja se emplea el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), aplicando un umbral de NDVI > 0,08 para identificar píxeles con presencia de algas pardas dentro de un área de interés (AOI) previamente definida, donde se observan de forma recurrente arribazones dominados por *R. okamurae*. La herramienta genera visualizaciones RGB con superposición de NDVI, mapas de ocurrencia y análisis de series temporales que incluyen cobertura (ha), promedio y mediana de NDVI para el AOI. Las salidas se exportan en formatos georreferenciados (GeoTIFF) y tablas estadísticas (.xlsx). Su aplicación en la playa de Los Lances (Tarifa, Cádiz) durante 2021 demuestra su capacidad para monitorizar y analizar la acumulación de arribazones de algas pardas en esta zona de estudio, ofreciendo una herramienta accesible y transferible para investigadores y gestores costeros.

Palabras clave: Python, Google Earth Engine API, Sentinel-2, alga parda invasora, seguimiento costero


Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 16 febrero 2026

Aplicación de código abierto basada en Sentinel-2 para el seguimiento de biomasa fotosintética intermareal: Arribazones del alga parda invasora *Rugulopteryx okamurae*

Haro, Sara ⁽¹⁾, Caballero, Isabel ⁽¹⁾, Navarro, Gabriel ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Depto. de Ecología y Gestión Costera, Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Cádiz, España

 0000-0002-0026-102X, sara.haro@csic.es ;  0000-0001-7485-0989, isabel.caballero@csic.es

 0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es

Resumen: El desarrollo de herramientas que acerquen la teledetección a sus potenciales usuarios constituye un reto clave para mejorar la monitorización ambiental. En este trabajo se presenta una aplicación de código abierto desarrollada en Python que integra la API de *Google Earth Engine* para la monitorización sistemática de biomasa fotosintética intermareal mediante imágenes Sentinel-2 desde 2017 hasta la actualidad. Los parámetros de entrada se han adaptado al seguimiento de arribazones del alga parda invasora *Rugulopteryx okamurae*, con el objetivo de analizar sus patrones espaciales y temporales de acumulación en playas. Desde 2015, *R. okamurae* se ha expandido rápidamente por el suroeste de Europa y el noroeste de África, generando importantes impactos ecológicos y socioeconómicos asociados a la acumulación masiva de biomasa en zonas costeras. El sistema automatiza la selección de imágenes libres de nubes según umbrales definidos por el usuario e incorpora la detección de condiciones de marea baja mediante el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI). Para la monitorización de la biomasa fotosintética durante la marea baja se emplea el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), aplicando un umbral de NDVI > 0,08 para identificar píxeles con presencia de algas pardas dentro de un área de interés (AOI) previamente definida, donde se observan de forma recurrente arribazones dominados por *R. okamurae*. La herramienta genera visualizaciones RGB con superposición de NDVI, mapas de ocurrencia y análisis de series temporales que incluyen cobertura (ha), promedio y mediana de NDVI para el AOI. Las salidas se exportan en formatos georreferenciados (GeoTIFF) y tablas estadísticas (.xlsx). Su aplicación en la playa de Los Lances (Tarifa, Cádiz) durante 2021 demuestra su capacidad para monitorizar y analizar la acumulación de arribazones de algas pardas en esta zona de estudio, ofreciendo una herramienta accesible y transferible para investigadores y gestores costeros.

Palabras clave: Python, Google Earth Engine API, Sentinel-2, alga parda invasora, seguimiento costero

An open-source application based on Sentinel-2 for monitoring intertidal photosynthetic biomass: Strandings of the invasive brown seaweed *Rugulopteryx okamurae*

Abstract: Developing tools that make remote sensing more accessible to potential users is a key challenge for improving environmental monitoring. This work presents an open-source application developed in Python that integrates the Google Earth Engine API for the systematic monitoring of intertidal photosynthetic biomass using Sentinel-2 imagery from 2017 to the present. Input parameters were adapted to monitor strandings of the invasive brown seaweed *Rugulopteryx okamurae*, with the aim of analysing its spatial and temporal accumulation patterns on beaches. Since 2015, *R. okamurae* has spread rapidly across southwestern Europe and northwestern Africa, causing significant ecological and socioeconomic impacts associated with the massive accumulation of biomass in coastal areas. The system automates the selection of cloud-free images based on user-defined thresholds and incorporates low-tide condition detection using the Normalized Difference Water Index (NDWI). For monitoring intertidal photosynthetic biomass during low tide, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is applied, using a threshold of NDVI > 0.08 to identify pixels with brown seaweed presence within a predefined area of interest (AOI), where strandings dominated by *R. okamurae* are recurrent. The application generates RGB visualizations with NDVI overlay, occurrence maps, and time-series analyses including coverage (ha), mean, and median NDVI for the AOI. Outputs are exported as georeferenced files (GeoTIFF)

and statistical tables (xlsx). Its application at Los Lances Beach (Tarifa, Cádiz) during 2021 demonstrates its capability to monitor and analyse stranded brown seaweed biomass, providing an accessible and transferable tool for researchers and coastal managers.

Keywords: Python, Google Earth Engine API, Sentinel-2, invasive brown seaweed, coastal monitoring

1. INTRODUCCIÓN

El alga parda invasora *Rugulopteryx okamuræ* (Dictyotales, Phaeophyceae), originaria del Pacífico nororiental y comúnmente conocida como alga asiática, representa actualmente una de las mayores amenazas para los ecosistemas costeros del suroeste de Europa y noroeste de África (Román & Vázquez, 2025). Incluida en el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras desde 2020 ([Orden TED/1126/2020](#)), esta alga ha experimentado una expansión sin precedentes desde su primera observación en el Estrecho de Gibraltar en 2015, alcanzando las costas atlánticas y mediterráneas de la Península Ibérica, el norte de Marruecos, la Macaronesia y el noroeste de Sicilia (Román & Vázquez, 2025). La colonización masiva de sustratos rocosos submareales por *R. okamuræ* está provocando una profunda transformación de los fondos marinos, con pérdida de biodiversidad, alteración de las redes tróficas y deterioro de los servicios ecosistémicos (García-Gómez *et al.*, 2020).

Las corrientes arrastran grandes cantidades de biomasa (arribazones) de *R. okamuræ* hasta la costa, donde se acumulan y se descomponen sobre la arena de las playas. Estos arribazones generan graves impactos socioeconómicos: asfixia de comunidades bentónicas, emisión de gases de efecto invernadero, generación de olores desagradables y afectación del uso recreativo de las playas. En los últimos cinco años, los municipios gaditanos y malagueños (Andalucía, España) han retirado miles de toneladas de biomasa, con costes que ascienden al millón de euros anuales (Mogollón *et al.*, 2024). Ante esta problemática, el [plan de gestión frente al alga *R. okamuræ* en la costa andaluza](#), aprobado en julio de 2025, establece la vigilancia y el seguimiento sistemático como elementos clave para orientar la gestión.

En este contexto, el desarrollo de metodologías basadas en teledetección para el seguimiento de *R. okamuræ* se ha convertido en una línea emergente de investigación. Hasta la fecha, solo se han publicado dos estudios sobre teledetección de arribazones de esta especie (Haro *et al.*, 2024; Roca *et al.*, 2022). En este trabajo se presenta una aplicación de escritorio de código abierto para la monitorización de la biomasa fotosintética intermareal en áreas de interés (AOI) definidas, donde crece o se acumula de forma dominante una única especie, utilizando imágenes de los satélites Sentinel-2. Los valores de entrada incluidos por defecto han sido configurados específicamente para el seguimiento y análisis de arribazones de algas pardas acumuladas en playas, como *R. okamuræ*, proporcionando a investigadores y gestores costeros una herramienta operativa para el análisis espaciotemporal de estas acumulaciones.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Descripción de la aplicación

Se trata de una aplicación de escritorio de código abierto desarrollada en Python 3 que integra la API de *Google Earth Engine* (GEE) para el seguimiento automatizado de biomasa fotosintética durante la marea baja. Se emplea el NDVI, índice de vegetación más empleado para la monitorización de productores primarios bentónicos durante la marea baja (Haro *et al.*, 2026). La aplicación incluye una interfaz gráfica de usuario construida con *CustomTkinter*, que permite configurar los parámetros de búsqueda (Tabla 1) y visualizar los resultados sin necesidad de conocimientos de programación.

La aplicación está configurada para generar y analizar mapas de arribazones del alga parda *R. okamuræ* acumulados en playas, con una resolución espacial de 10 m, a partir de imágenes Sentinel-2.

2.1.1. Autenticación y acceso a datos satelitales

El acceso a las imágenes Sentinel-2 se realiza mediante autenticación OAuth con GEE. La aplicación utiliza la colección "COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED", que proporciona imágenes de reflectancia superficial desde marzo de 2017 hasta la actualidad.

2.1.2. Definición del área de estudio

El usuario proporciona un *asset* vectorial (formato *shapefile*) alojado en GEE que delimita el AOI, indicando como entrada la ruta correspondiente (Tabla 1). Este AOI se emplea para recortar las imágenes y calcular los índices espectrales (Ec. 1; Ec. 2), restringiendo el análisis a la línea de costa o a la zona intermareal.

El estudio se centra en la playa urbana de Los Lances, ubicada en Tarifa (Cádiz). Los Lances es una playa arenosa (36°02'24"N, 5°38'04"O; Fig. 1) situada en el Parque Natural del Estrecho de Gibraltar, una de las zonas más afectadas por los arribazones de *R. okamuræ* desde 2015. El AOI fue delimitado manualmente, combinando conocimientos de campo y observación de imágenes satelitales adquiridas durante la marea más baja, abarcando una superficie de 21 ha.

2.1.3. Filtrado y selección de imágenes

Se implementa un sistema de filtrado multicapa para la selección automática de imágenes Sentinel-2 adecuadas para el análisis de biomasa fotosintética bajo condiciones mareales comparables:

- **Filtro temporal y espacial:** El usuario define un rango de fechas y un identificador de tesela Sentinel-2 (*tile*).

- **Filtro de cobertura nubosa:** Se establece un umbral máximo de nubosidad mediante el metadato CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE de Sentinel-2, que indica el porcentaje de píxeles nubosos a nivel de escena completa.
- **Filtro de presencia de agua:** Para maximizar la superficie intermareal expuesta y garantizar la comparabilidad de las observaciones, se calcula el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI; Ecuación 1):

$$NDWI = (B3 - B8) / (B3 + B8) \quad (1),$$

donde B3 (verde, 560 nm) y B8 (infrarrojo cercano, 842 nm) son bandas de Sentinel-2. Valores de NDWI > 0 indican presencia de agua, mientras que en zonas intermareales los píxeles de arena húmeda presentan valores intermedios (0-0,3). El usuario selecciona el umbral de NDWI (≥ 0 ; 0,1; 0,2 o 0,3) a partir del cual un píxel se clasifica como agua, adaptándolo al AOI. Las imágenes cuyo porcentaje de píxeles de agua supere el valor máximo definido son excluidas automáticamente.

Tabla 1. Parámetros de entrada para el seguimiento y análisis de los arribazones del alga parda *R. okamurae* en la playa urbana de Los Lances (Tarifa, Cádiz) durante el año 2021.

Parámetros	Descripción	Valores
Fechas	Inicio y final del periodo de análisis	2021-01-01 2021-12-31
Tile	Identificador de tesela Sentinel-2	T29SQV
Máx. nubes (%)	Porcentaje máximo de cobertura nubosa en la tesela	20
Máx. agua (%)	Porcentaje máximo de píxeles de agua en el AOI	10
Umbral NDWI	Valor NDWI para clasificar píxeles como agua	≥ 0.2
Rango NDVI	Umbral inferior y superior del NDVI	0,08 - 1
Asset GEE	Áreas de interés (AOI)	projects/ee-XX/assets/AOI
EPGS	Sistemas de coordenadas de salida	32629
Directorio de salida	Nombre de la carpeta de salida	C:/Rugulopteryx/AOI

2.1.4. Identificación de biomasa fotosintética

Para la detección de píxeles con presencia de biomasa fotosintética se calcula el NDVI (Ec. 2):

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4) \quad (2),$$

donde B8 (infrarrojo cercano, 842 nm) y B4 (rojo, 665 nm) son bandas de Sentinel-2. El usuario define un rango de valores NDVI, variable según el hábitat de estudio, para seleccionar los píxeles con biomasa fotosintética (Haro *et al.*, 2026); los que quedan fuera se asignan como NoData y se excluyen de los cálculos posteriores. Para el caso de los arribazones de algas pardas se aplica un umbral mínimo de 0,08, que permite discriminarlos respecto a la arena (Haro *et al.*, 2023, 2024).

2.1.5. Exportación, visualización y análisis

Para cada imagen procesada, se generan y descargan dos archivos GeoTIFF georreferenciados: NDVI (recortado al AOI) y RGB (bandas B4, B3, B2).

La aplicación incluye un visor integrado en el que la imagen RGB sirve como fondo para el control de calidad de nubes sobre el AOI. Sobre ella se superponen, para este caso de estudio, únicamente los píxeles con NDVI comprendido entre 0,1 y 0,6, atribuidos a la presencia de arribazones de algas pardas, representados mediante una paleta de colores amarillo-naranja-marrón. La superposición de NDVI puede activarse o desactivarse, y se incluyen controles para navegar entre las imágenes seleccionadas en orden cronológico.

El visor genera gráficos de evolución temporal de cobertura (número de píxeles, expresado en hectáreas), promedio y mediana del NDVI para el AOI, así como un mapa de ocurrencia que representa el porcentaje de veces que cada píxel presenta valores válidos de NDVI a lo largo de la serie analizada. Los datos de las series temporales pueden exportarse en formato Excel (.xlsx) para su análisis posterior.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el periodo de estudio analizado, de enero a diciembre de 2021, se procesaron 109 imágenes, de las cuales 35 cumplieron con los criterios de cobertura nubosa y presencia de agua. De este conjunto, se descartaron 4 imágenes debido a la presencia de nubes, sombras o *sun glint*, identificados mediante inspección visual de las composiciones RGB (Fig. 1).

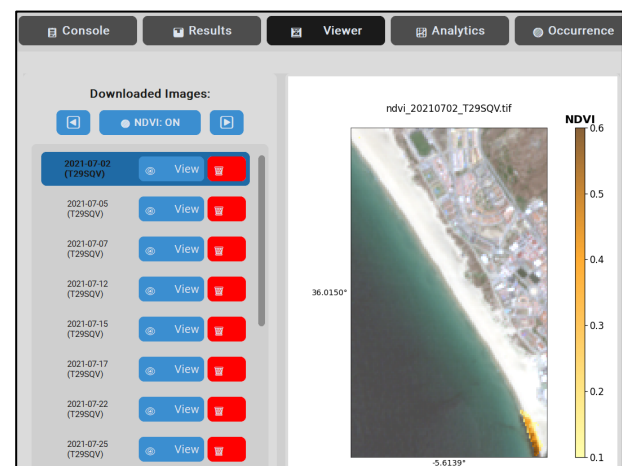


Figura 1. Visor con las fechas de las imágenes Sentinel-2 seleccionadas y los píxeles con valores de NDVI atribuidos a la presencia de arribazones de algas pardas para el 2 de julio de 2021.

Finalmente, 31 imágenes fueron seleccionadas para el análisis temporal y la elaboración del mapa de ocurrencia (Fig. 2; Fig. 3).

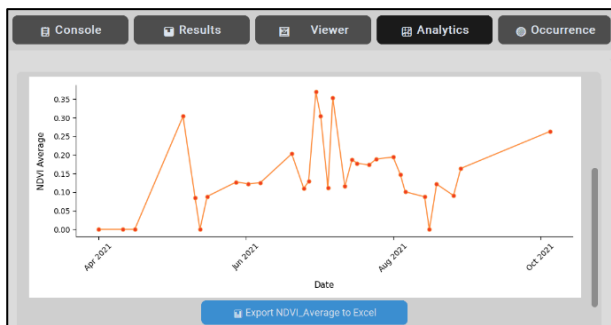


Figura 2. Serie temporal de NDVI promedio para el AOI en el año 2021.

La mayor presencia de arribazones se observó el 25/07/2021 (con 3,7 ha), mientras que los valores promedio de NDVI oscilaron entre 0,11 y 0,35 para el AOI durante el mes de julio (Fig. 2). El mapa de ocurrencia muestra cómo las mayores acumulaciones de arribazones se producen en el extremo este de la playa urbana de Los Lances (Fig. 3), lo cual probablemente ocurre con vientos del suroeste, oeste o noroeste, como observaron Haro *et al.* (2024). Estos análisis sientan las bases para el desarrollo futuro de sistemas de alerta temprana, la optimización de las labores de limpieza y la evaluación de áreas potenciales de emisión de gases de efecto invernadero.

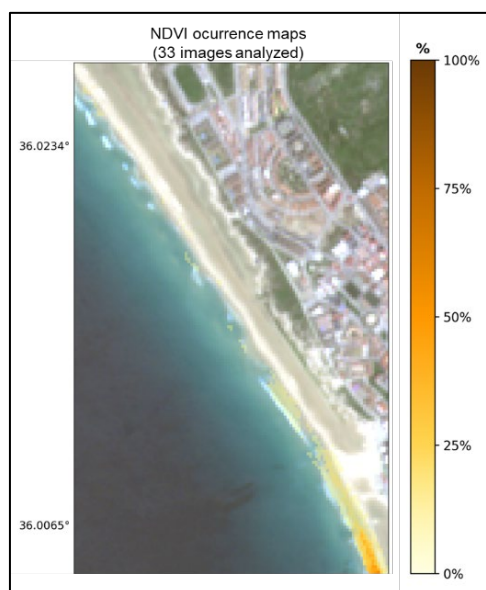


Figura 3. Mapa de frecuencia de los píxeles con valores de NDVI atribuidos a arribazones de algas pardas de *R. okamurae* en la playa de Los Lances (2021).

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una aplicación de código abierto que integra el flujo completo de procesamiento de imágenes Sentinel-2 para la monitorización de la biomasa fotosintética intermareal, como los arribazones de *R. okamurae*: desde la búsqueda y el filtrado de imágenes hasta la generación de series temporales, estadísticos de NDVI y mapas de ocurrencia. Su interfaz gráfica intuitiva elimina las barreras técnicas habituales en teledetección, permitiendo su uso por parte de investigadores y

gestores costeros sin conocimientos en programación.

5. AGRADECIMIENTOS

Este software ha sido financiado por los VIII Premios Mares Circulares (Asociación Chelonia/Coca-Cola) y por un contrato postdoctoral (DGP_POST_2024_00524) financiado por la Junta de Andalucía / CUII y el Fondo Social Europeo Plus (FSE+).

6. REFERENCIAS

García-Gómez, J. C., Sempere-Valverde, J., González, A. R., Martínez-Chacón, M., Olaya-Ponzzone, L., Sánchez-Moyano, E., Ostalé-Valriberas, E., & Megina, C. (2020). From exotic to invasive in record time: The extreme impact of *Rugulopteryx okamurae* (Dictyotales, Ochrophyta) in the strait of Gibraltar. *Science of the Total Environment*, 704, 0–2. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135408>

Haro, S., Bermejo, R., Veylit, L., & Morrison, L. (2026). Updated 2.0 to Biointertidal Mapper software: A satellite approach for NDVI-based intertidal habitat mapping. *SoftwareX*, 33, 102539. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2026.102539>

Haro, S., Bermejo, R., Wilkes, R. J., Bull, L., & Morrison, L. (2023). Monitoring intertidal golden tides dominated by *Ectocarpus siliculosus* using Sentinel-2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103451. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103451>

Haro, S., Morrison, L., Caballero, I., Figueroa, F. L., Korbee, N., Navarro, G., & Bermejo, R. (2024). Assessing Golden Tides from Space: Meteorological Drivers in the Accumulation of the Invasive Algae *Rugulopteryx okamurae* on Coasts. *Remote Sensing*, 16(15), 2689. <https://doi.org/10.3390/rs16152689>

Mogollón, S. L., Zilio, M. I., Buitrago, E. M., Caraballo, M. Á., & Yñiguez, R. (2024). Economic impact of *Rugulopteryx okamurae* (Dictyotales, Ochrophyta) along the Andalusian coastline: the case of Tarifa, Spain. *Wetlands Ecology and Management*, 32(1), 19–32. <https://doi.org/10.1007/s11273-023-09951-2>

Roca, M., Dunbar, M. B., Román, A., Caballero, I., Zoffoli, L. M., Gernez, P., & Navarro, G. (2022). Monitoring the marine invasive alien species *Rugulopteryx okamurae* using unmanned aerial vehicles and satellites. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1004012>

Román, S., & Vázquez, R. (2025). Assessment of the *Rugulopteryx okamurae* invasion in Northeastern Atlantic and Mediterranean bioregions: Colonisation status, propagation hypotheses and temperature tolerance thresholds. *Marine Environmental Research*, 207, 107093. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107093>