

Ollega Caro, J.; López-Nieta, D.; Rodríguez-Galiano, V.; Canero, F. Estudio de perturbaciones forestales en Andalucía oriental a partir de series temporales de Sentinel-2 y la aplicación del algoritmo BFAST

Estudio de perturbaciones forestales en Andalucía oriental a partir de series temporales de Sentinel-2 y la aplicación del algoritmo BFAST

Ollega Caro, Jose M. ¹ López-Nieta, Diego ¹ Rodríguez-Galiano, Victor ¹ Canero, Francisco M. ¹

¹ " Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, 41004 Sevilla, España"

ORCID: López-Nieta [0000-0002-6408-2637](https://orcid.org/0000-0002-6408-2637) Rodríguez-Galiano [0000-0002-5422-8305](https://orcid.org/0000-0002-5422-8305) Canero [0000-0002-7813-1487](https://orcid.org/0000-0002-7813-1487)

Correspondencia: jollega@us.es dlopezdelanieta@us.es vrgaliano@us.es fcanero@us.es

RESUMEN

El estudio y monitorización de las perturbaciones forestales (forest disturbances), resulta esencial para la gestión sostenible del medio natural, especialmente en contextos mediterráneos donde la vegetación se ve sometida a múltiples factores de estrés. El objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar las perturbaciones forestales entre 2018 y 2024 existentes en un área forestal de 276.500 ha de Andalucía oriental, empleando series temporales de compuestos decenales de NDVI, NDWI y NBR calculados a partir de Sentinel-2. El algoritmo Breaks For Additive Season and Trend (BFAST) fue aplicado a las series temporales de índices, identificando puntos de ruptura asociados a perturbaciones. Los resultados obtenidos mostraron una mayor exactitud para NDVI, llegando a alcanzar una exactitud global (accuracy) del 73,64%.


Palabras clave: *bosque, gestión sostenible, índices espectrales, Sentinel-2, puntos de ruptura.*



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

Estudio de perturbaciones forestales en Andalucía oriental a partir de series temporales de Sentinel-2 y la aplicación del algoritmo BFAST

Ollega Caro, Jose M. ⁽¹⁾, López-Nieta, Diego ⁽¹⁾, Rodríguez-Galiano, Victor ⁽¹⁾, Canero, Francisco M. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla Sevilla, España.

jollega@us.es ;  0000-0002-6408-2637, dlopezdelanieta@us.es

 0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es ;  0000-0002-7813-1487, fcanero@us.es

Resumen: El estudio y monitorización de las perturbaciones forestales (*forest disturbances*), resulta esencial para la gestión sostenible del medio natural, especialmente en contextos mediterráneos donde la vegetación se ve sometida a múltiples factores de estrés. El objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar las perturbaciones forestales entre 2018 y 2024 existentes en un área forestal de 276.500 ha de Andalucía oriental, empleando series temporales de compuestos decenales de NDVI, NDWI y NBR calculados a partir de Sentinel-2. El algoritmo *Breaks For Additive Season and Trend* (BFAST) fue aplicado a las series temporales de índices, identificando puntos de ruptura asociados a perturbaciones. Los resultados obtenidos mostraron una mayor exactitud para NDVI, llegando a alcanzar una exactitud global (*accuracy*) del 73,64%.

Palabras clave: bosque, gestión sostenible, índices espectrales, Sentinel-2, puntos de ruptura.

Estimation of forest disturbances from satellite image time series and the application of the BFAST algorithm

Abstract: *The study and monitoring of forest disturbances are essential for the sustainable management of natural environments, particularly in Mediterranean contexts where vegetation is exposed to multiple stress factors. The objective of this work is to identify and characterize forest disturbances in a 276,500 ha forested area of eastern Andalusia, using time series of Sentinel-2 satellite images and the calculation of spectral indices: NDVI, NDWI, and NBR. This information was processed using the Breaks For Additive Season and Trend (BFAST) algorithm, which allowed the identification of breakpoints associated with disturbances. The results showed a higher effectiveness of the NDVI spectral index for detecting disturbances in the Mediterranean context, reaching an overall accuracy of 73.64% for forest disturbance estimation.*

Keywords: *forest, sustainable management, spectral indices, Sentinel-2, breakpoints.*

1. INTRODUCCIÓN

Las perturbaciones en áreas forestales hacen referencia a la pérdida de biomasa o cobertura del dosel arbóreo por factores de origen tanto natural como antrópico tales como: tormentas, incendios forestales, sequías, plagas o actuaciones selvícolas (Seidl *et al.*, 2017). A diferencia del decaimiento forestal, estos procesos se caracterizan por estar más vinculados con eventos puntuales de corta duración, con impactos abruptos sobre la estructura y funcionamiento del ecosistema (Gnilke & Sanders, 2022).

En las últimas décadas se han documentado cambios significativos en la frecuencia, intensidad y extensión espacial de los regímenes de perturbaciones a nivel global, especialmente en áreas forestales (Seidl *et al.*, 2017). El cambio climático, junto con la intensificación de eventos extremos climáticos han provocado un cambio en el patrón de actuación de las perturbaciones naturales, tanto en ocurrencia, magnitud como en sincronía. En este contexto, resulta imprescindible

implementar herramientas de monitoreo operativo que integren la dimensión espacial y temporal de las perturbaciones, así como la identificación de los principales agentes causales de su desarrollo.

Existen diferentes algoritmos capaces de extraer información de series temporales de imágenes de satélite y aplicarlos al sector forestal (Gitelson *et al.*, 2002), entre ellos destacan: *Continuous Change Detection and Classification* (CCDC), *Landsat-based Trends in Disturbance and Recovery Detection* (LandTrendr) y *Breaks for Additive Season and Trend* (BFAST). No obstante, este tipo de algoritmos presentan la limitación de ser más efectivos en la detección de cambios amplios que en la identificación y caracterización de degradaciones sutiles, por lo que en ocasiones se combinan con otras técnicas analíticas como clasificadores de *Random Forest* o análisis de anomalías. En Andalucía, ya existe algún estudio relativo al análisis de perturbaciones forestales, en cuyo caso se analizan las perturbaciones mediante un enfoque integral del riesgo basado en: valor expuesto, magnitud

del peligro, susceptibilidad del ecosistema y la falta de capacidad adaptativa empleando para ello: datos climáticos y forestales como variables auxiliares predictivas en el entorno de Sierra Nevada y Sierra de las Nieves (Navarro & Ariza, 2024).

En este contexto, el objetivo general de esta contribución es identificar perturbaciones forestales presentes en distintas áreas forestales del territorio andaluz. Los objetivos específicos son: (i) evaluar la extensión de las perturbaciones existentes y explorar la severidad de las mismas en base a sus valores de magnitud relativa; (ii) evaluar los índices espectrales NDVI, NDWI y NBR como variables para detectar perturbaciones.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio corresponde con la tesela de Sentinel-2: 30SVG (12.000 km²) en la parte oriental de Andalucía, dentro de la cual se ha trabajado con las superficies forestales arboladas (276.500 ha). Engloba total o parcialmente algunos espacios naturales protegidos de relevancia para el territorio andaluz como es el caso de los Parques Naturales de: Sierra Mágina, Sierra de Cazorla, Segura y las Villas, Sierra de Huétor, Sierra de Baza y Sierra Nevada.

La gama de especies y formaciones forestales es variada, destacando los bosques de frondosas, los bosques mixtos y los bosques de coníferas (Figura 1). Desde 2018 en la zona se han producido distintas perturbaciones derivadas de incendios forestales, sequías, así como una inadecuada gestión forestal. La superficie forestal arbolada cuya información fue obtenida del Mapa Forestal Español (escala 1:50.000) está cubierta principalmente por encinares (*Quercus ilex*), y pinares (*Pinus halepensis* y *Pinus nigra*).

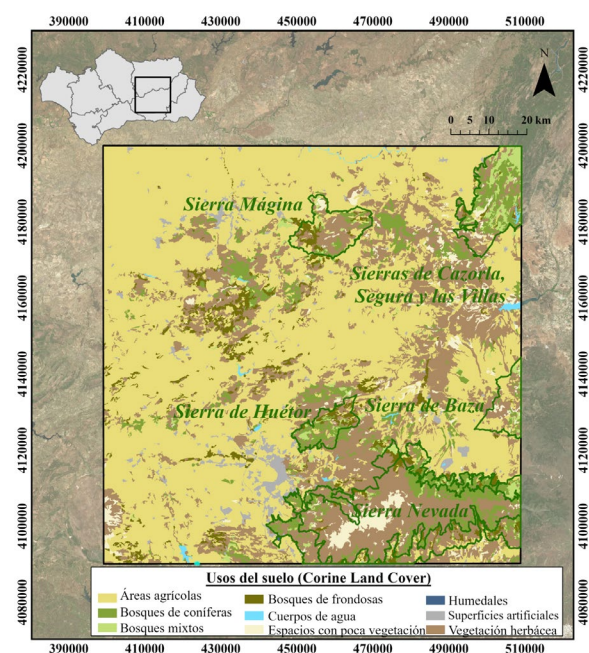


Figura 1. Se utilizó una zona de estudio ubicada en Andalucía oriental que abarcaba una extensión en torno a 12.000 km² y que coincidía con una tesela de Sentinel-2.

2.2. Métodos

El algoritmo BFAST fue seleccionado por su capacidad para identificar rupturas significativas en la serie temporal asociada al desarrollo de perturbaciones, lo que permite analizar y detectar perturbaciones a lo largo de toda la serie temporal de análisis: 2018-2024 (Verbesselt *et al.*, 2010.).

El algoritmo BFAST modela mediante una descomposición aditiva, la cual representa los datos mediante la suma de tres componentes principales: tendencia, estacionalidad y ruido, haciendo uso para ello de modelos lineales segmentados y funciones armónicas para detectar cambios abruptos en la señal espectral (Verbesselt *et al.*, 2010). Este algoritmo es capaz de analizar la serie temporal completa de forma iterativa mediante la división en segmentos temporales independientes estimados por los puntos de ruptura detectados.

La detección de cambios se realizó considerando la magnitud del cambio, definida como la diferencia entre el valor inicial y final de cada segmento de tendencia obtenido mediante el algoritmo BFAST. Se clasificaron como píxeles perturbados aquellos cuya magnitud de cambio se situó por debajo de un umbral relativo definido como: $\mu - 2\sigma$, donde μ representa el valor medio de la distribución de cambios y σ su desviación típica. Este criterio permitió adaptar el umbral a la distribución específica de los datos en cada caso, focalizando el análisis exclusivamente en procesos de degradación. Con el fin de evitar la detección de cambios puntuales o espurios, únicamente se consideraron aquellos casos en los que la dinámica previa y posterior a la ruptura se mantuvo durante un periodo suficientemente prolongado. Para ello, se estableció un tamaño mínimo de segmento temporal de $h = 0,125$, asegurando así la persistencia del cambio detectado.

BFAST se aplicó a series temporales Sentinel-2 (reflectancia de superficie) adquiridas de Google Earth Engine mediante el producto Copernicus Sentinel-2 Surface Reflectance Harmonized ("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED") trabajando a una resolución espacial de 10m y aplicando un remuestreo informacional de las bandas originalmente a 20m. Para reducir el impacto de la nubosidad se aplicó un enmascarado de nubes y sombras basado en S2CloudLess y se generaron compuestos decenales mediante el cálculo de la mediana de los valores disponibles y se calcularon los índices NDVI, NDWI y NBR como variables de entrada del algoritmo BFAST. Con el objetivo de optimizar el procesamiento y centrar el análisis en masas forestales, el área de estudio se restringió a coberturas forestales medianamente consolidadas, combinando información de los usos forestales del Corine Land Cover y un umbral medio de NDVI por encima de 0,2. Dado que el análisis opera a nivel de píxel, se seleccionó una muestra representativa de 1000 puntos distribuida entre los tres tipos de bosque presentes en el área de estudio a partir de un muestreo aleatorio estratificado y la información del Corine Land Cover, con el propósito de garantizar una adecuada distribución entre los tipos de bosque presente. La validación se llevó a cabo mediante fotointerpretación

visual, considerando el contexto espacial en el que se ubica cada píxel, a partir de la ortofotografía del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) correspondiente al año 2022, adoptado como periodo de referencia para la validación. Asimismo, se definió una ventana temporal de validación 2018–2022 para el estrato no perturbado con el objetivo de mejorar la exactitud espacial en relación con el producto de referencia. La muestra de validación se diseñó mediante un muestreo aleatorio estratificado, seleccionándose 100 píxeles en el estrato no perturbado, mientras que para el estrato perturbado se realizó una validación exhaustiva mediante la inclusión de la totalidad de las áreas identificadas como perturbadas según el umbral relativo previamente definido.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La descomposición de la serie temporal del índice NBR (2018-2024) evidenció la presencia de rupturas espectrales significativas en determinadas zonas del área de estudio; no obstante, únicamente el 2,3 % de los píxeles analizados fueron clasificados como perturbados

conforme al criterio de detección establecido, mientras que el NDVI identificó un 3,06% de píxeles perturbados, así como el NDWI un total de 2,27%. A pesar de la relativa concordancia en la proporción total de áreas detectadas entre los tres índices, debemos considerar que las diferencias existentes pueden devenir de la configuración espectral de los índices, donde el NBR responde con mayor eficiencia a alteraciones abruptas, mientras que el NDVI y el NDWI pueden responder a cambios más sutiles en vegetación y humedad.

La distribución de los valores de magnitud de las áreas perturbadas indican una mayor sensibilidad a perturbaciones intensas por parte del índice NBR, ya que nos encontramos ante el valor medio más negativo: $\mu = -0,2938$, así como el valor mínimo más extremo: $-0,6982$, siendo un comportamiento esperado debido a la respuesta de este índice para identificar alteraciones abruptas. El NDWI en su caso presenta una respuesta más homogénea en dicha detección relacionado con la sensibilidad del contenido hídrico en la vegetación, presentando una media algo más baja: $\mu = -0,2863$ y una menor dispersión de los valores existentes.

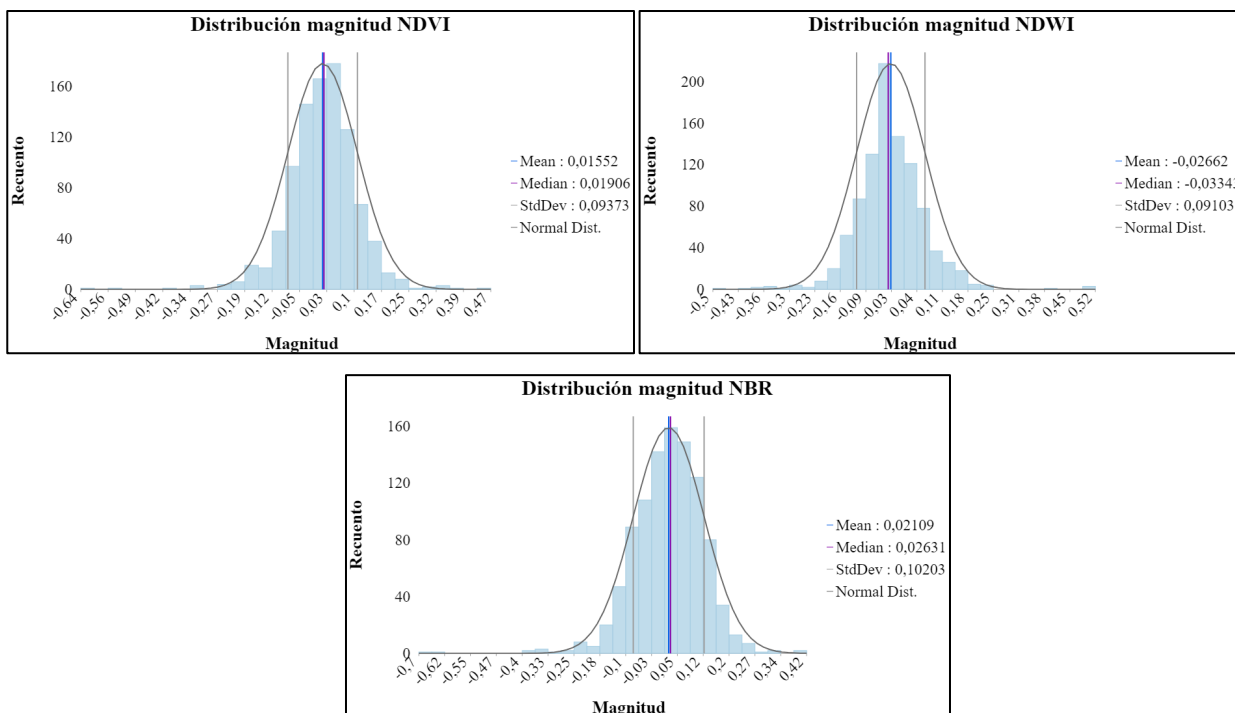


Figura 2. Histograma de distribución de los valores de magnitud del cambio para las tres series temporales analizadas.

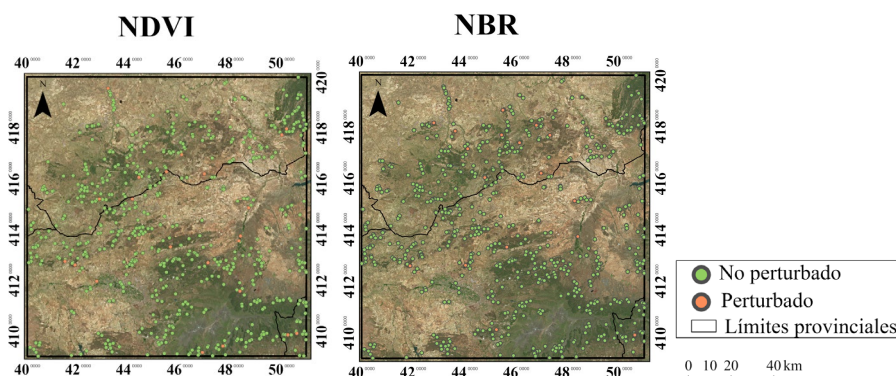


Figura 3. Identificación de áreas perturbadas y no perturbadas para las series temporales de análisis del NDVI y NBR (2018-2024).

Considerando que, con anterioridad, se había identificado que los píxeles de las masas forestales de coníferas eran las más afectadas por perturbaciones y la operatividad del algoritmo para trabajar a nivel de píxel, se optó por analizar un caso concreto de perturbación severa en masas forestales de coníferas detectado por el índice NDWI. En dicha serie podemos observar valores que oscilan entre -1 y -0,2, lo que indica un bajo contenido hídrico en el follaje arbóreo, el ciclo estacional además es ciertamente marcado, donde el contenido en agua es mayor durante las fases de crecimiento activo y menores durante el estrés hídrico del periodo estival. El análisis de la tendencia refleja cambios abruptos tanto a principios del 2022 como a finales del 2023 que pudieran estar asociados a procesos de perturbación, pudiendo indicar cambios relevantes en materia de contenido de agua existente.

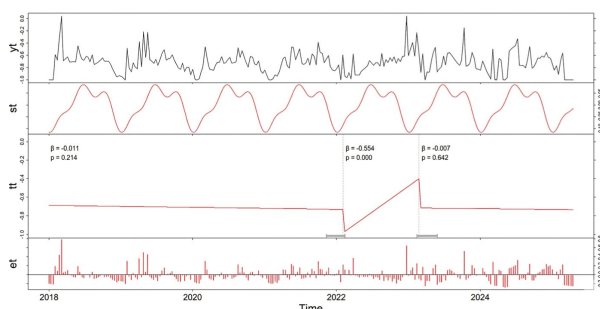


Figura 4. Ejemplo de descomposición de la serie temporal de NDWI en estacionalidad, tendencia y ruido para un píxel de bosque de coníferas.

Tal como se puede ver en la tabla 1, el NDVI fue el índice con mejor desempeño, al presentar un error de comisión moderado (24,14%), y la mayor exactitud global (73,64%). NDWI mostró un comportamiento similar, aunque ligeramente inferior en términos de exactitud global (comisión 22,73%, exactitud global 71,31%). En cambio, NBR registró los mayores errores de comisión (26,09%) y la menor exactitud global (69,92%), lo que indicó una tendencia a sobredetectar perturbaciones y, por tanto, a generar un mayor número de falsos positivos.

Nuestros resultados presentan cierta concordancia con lo reportado por Alonso *et al.* (2023), donde el NDVI presentó el mayor desempeño con una exactitud global cercana al 82%, mientras que el NBR alcanzó una exactitud inferior (70%) asociada a un elevado número de falsos positivos, presentando por tanto, los resultados obtenidos en este estudio un patrón consistente con la literatura existente. Pudiendo provenir las diferencias existentes de las características del área de análisis centrada en Galicia, de la metodología de detección de perturbaciones consistente en árboles de decisión supervisado o del proceso de validación implementado con un mayor número de muestras de validación (Alonso *et al.*, 2023).

Tabla 1. Distribución de las métricas de validación.

Índice	Error Comisión	Precisión usuario	Exactitud Global
NDVI	24,14%	75,86%	73,64%
NDWI	22,73%	77,27%	71,31%
NBR	26,09%	73,91%	69,92%

4. CONCLUSIONES

La validación mostró que NDVI fue el índice más adecuado para detectar perturbaciones forestales, en este caso específico, aunque los resultados son similares entre los tres índices como se puede observar en el buen desempeño del NDWI, especialmente en eventos asociados al estrés hídrico. Como líneas de mejora, se planteó incorporar nuevos índices espectrales y comparar BFAST con otros algoritmos de detección de cambios (p. ej., CCDC o LandTrendr). Finalmente, se consideró relevante evaluar la transferibilidad del enfoque a otros contextos similares al andaluz (p. ej., Grecia, Italia y sur de Portugal).

5. AGRADECIMIENTOS

El autor principal de este artículo cuenta con la financiación de la ayuda “Contrato Fundación Ramón Areces de Formación de Investigadores para la elaboración de su tesis doctoral”.

6. REFERENCIAS

- Alonso, L., Picos, J., & Armesto, J. (2023). Automatic forest change detection through a bi-annual time series of satellite imagery: Toward production of an integrated land cover map. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118, Artículo 103289. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103289>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- Gnilke, A., & Sanders, T. G. M. (2022). Distinguishing abrupt and gradual forest disturbances with MODIS-based phenological anomaly series. *Frontiers in Plant Science*, 13.
- Navarro-Cerrillo, R. M., & Ariza-Salamanca, A. J. (2024). Uncovering hazards and adaptive capacity: A comprehensive risk assessment study in three conservation areas in Spain. *Forest Ecology and Management*, 572, 122324.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., *et al.* (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402.
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., *et al.* (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>