

Martínez Barbáchano, R.; Escayo Menéndez, J.; Pérez-Cabello, F.; Lozano Valencia, P. Retrodispersión estacional en banda C de Sentinel-1 en bosque tropical seco; interacciones entre régimen ecohidrológico y geometría de observación.

Retrodispersión estacional en banda C de Sentinel-1 en bosque tropical seco; interacciones entre régimen ecohidrológico y geometría de observación.

Martínez Barbáchano, Rubén ¹ Escayo Menéndez, Joaquín ² Pérez-Cabello, Fernando ¹
Lozano Valencia, Pedro José ³

¹ Universidad de Zaragoza, España

² Universidad Politécnica de Madrid

³ Universidad del País Vasco

ORCID: Martínez Barbáchano [0000-0002-9176-3112](https://orcid.org/0000-0002-9176-3112) Escayo Menéndez [0000-0002-4394-5018](https://orcid.org/0000-0002-4394-5018) Pérez-Cabello [0000-0003-4831-4060](https://orcid.org/0000-0003-4831-4060) Lozano Valencia [0000-0002-1345-5704](https://orcid.org/0000-0002-1345-5704)

Correspondencia: rubenztm@gmail.com J.escayo@upm.es fcabello@unizar.es pedrojose.lozano@ehu.eus

RESUMEN

La presente investigación muestra un flujo de trabajo reproducible para interpretar series temporales SAR Sentinel-1 en ecosistemas tropicales estacionales evitando ambigüedades fenológicas. El estudio se desarrolló en el Parque Nacional Santa Rosa (Costa Rica) considerando tres ambientes del bosque tropical seco caducifolio. Las series multi-
anuales (2017–2025) fueron transformadas a ciclo anual plegado (DOY) para aislar la componente estacional, y se analizaron las polarizaciones VV y VH junto con índices diferenciales (VV–VH, VH–VV) y métricas temporales como mínimo seco, inicio hidrológico funcional (umbral del 30% de amplitud), pendientes tempranas y anisotropía entre órbitas. Los resultados muestran la ausencia de máximos estructurales consistentes y la presencia de fuerte anisotropía orbital, indicando que la señal en banda C está dominada por transiciones suelo-dosel dependientes de la geometría de observación durante el reverdecimiento temprano. Se propone un criterio operativo para distinguir fenología real de artefactos ecohidrológicos; un evento fenológico debe ser estable en DOY, independiente de la órbita y coherente entre polarizaciones. En este ecosistema estas condiciones no se cumplen, evidenciando que Sentinel-1 detecta estados ecohidrológicos recurrentes más que el momento de rebrote. El método proporciona una base replicable para análisis fenológico radar en regiones tropicales estacionales.



Palabras clave: SAR, series temporales, Sentinel-1, bosque tropical seco, régimen ecohidrológico, geometría de observación

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 17 febrero 2026


Retrodispersión estacional en banda C de Sentinel-1 en bosque tropical seco; interacciones entre régimen ecohidrológico y geometría de observación.

Martínez Barbáchano, Rubén ⁽¹⁾, Escayo Menéndez, Joaquín ⁽²⁾, Pérez-Cabello, Fernando ⁽¹⁾, Lozano Valencia, Pedro José ⁽⁴⁾


⁽¹⁾ Universidad de Zaragoza, España.

 0000-0002-9176-3112, rubenztm@gmail.com ;  0000-0003-4831-4060, fcabello@unizar.es.

⁽²⁾ Universidad Politécnica de Madrid, España.

 0000-0002-4394-5018, J.escayo@upm.es.

⁽⁴⁾ Universidad del País Vasco, España.

 0000-0002-1345-5704, pedrojose.lozano@ehu.es.

Resumen: La presente investigación muestra un flujo de trabajo reproducible para interpretar series temporales SAR Sentinel-1 en ecosistemas tropicales estacionales evitando ambigüedades fenológicas. El estudio se desarrolló en el Parque Nacional Santa Rosa (Costa Rica) considerando tres ambientes del bosque tropical seco caducifolio. Las series multi-anales (2017–2025) fueron transformadas a ciclo anual plegado (DOY) para aislar la componente estacional, y se analizaron las polarizaciones VV y VH junto con índices diferenciales (VV–VH, VH–VV) y métricas temporales como mínimo seco, inicio hidrológico funcional (umbral del 30% de amplitud), pendientes tempranas y anisotropía entre órbitas. Los resultados muestran la ausencia de máximos estructurales consistentes y la presencia de fuerte anisotropía orbital, indicando que la señal en banda C está dominada por transiciones suelo-dosel dependientes de la geometría de observación durante el reverdecimiento temprano. Se propone un criterio operativo para distinguir fenología real de artefactos ecohidrológicos; un evento fenológico debe ser estable en DOY, independiente de la órbita y coherente entre polarizaciones. En este ecosistema estas condiciones no se cumplen, evidenciando que Sentinel-1 detecta estados ecohidrológicos recurrentes más que el momento de rebrote. El método proporciona una base replicable para análisis fenológico radar en regiones tropicales estacionales.

Palabras clave: SAR, Sentinel-1, series temporales, bosque tropical seco, eco-hidrología.

Seasonal C-band backscatter in tropical dry forest: interactions between ecohydrological regime and observation geometry

Abstract: This work presents a reproducible workflow to interpret Sentinel-1 SAR time series in seasonal tropical ecosystems while avoiding phenological misinterpretations. The study was conducted in Santa Rosa National Park (Costa Rica), considering three environments of the Mesoamerican tropical dry forest. Multi-annual series (2017–2025) were transformed into folded annual cycles (DOY) to isolate seasonal variability. VV and VH polarizations were analyzed together with differential indices (VV–VH, VH–VV) and temporal metrics including dry minimum, functional hydrological onset (30% amplitude threshold), early slopes, and orbital anisotropy. Results show the absence of consistent structural maxima and strong orbital dependence, indicating that C-band backscatter is dominated by geometry-dependent soil–canopy interactions during early greening. An operational criterion is proposed to distinguish real phenology from ecohydrological artifacts: a phenological event must be stable in DOY, orbit-independent, and consistent across polarizations. These conditions are not met, suggesting that Sentinel-1 captures recurrent ecohydrological states rather than leaf-out timing. The method provides a transferable framework for radar-based phenological analysis in seasonal tropical ecosystems.

Keywords: SAR, Sentinel-1 time series, tropical dry forest, ecohydrological regime, observation geometry.

1. INTRODUCCIÓN

Las series temporales SAR Sentinel-1 permiten el análisis continuo de la dinámica de la vegetación al ser

independientes de la nubosidad. Sin embargo, en ecosistemas tropicales estacionales persiste una ambigüedad fundamental: la variabilidad de la retrodispersión puede responder tanto a procesos

fenológicos como a cambios en el régimen ecohidrológico y en la geometría de observación. Este trabajo aborda esta problemática en el bosque tropical seco del Parque Nacional Santa Rosa (Costa Rica), proponiendo un enfoque basado en ciclos anuales plegados (DOY) y métricas derivadas de polarización y órbita para distinguir entre señal fenológica real y efectos geométrico-hidrológicos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el Parque Nacional Santa Rosa (Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica), dentro del bioma de bosque tropical seco caducifolio mesoamericano (Fig. 1). Se analizaron tres ambientes representativos con diferente disponibilidad hídrica y fisiografía: (i) sector costero próximo a Playa Naranjo, (ii) valles interiores de la Hacienda Santa Rosa y (iii) meseta ignimbrítica en el sector nordeste del parque. Estos ambientes presentan un marcado régimen estacional seco-húmedo, con una estación seca prolongada y una rápida transición hidrológica al inicio de las lluvias.

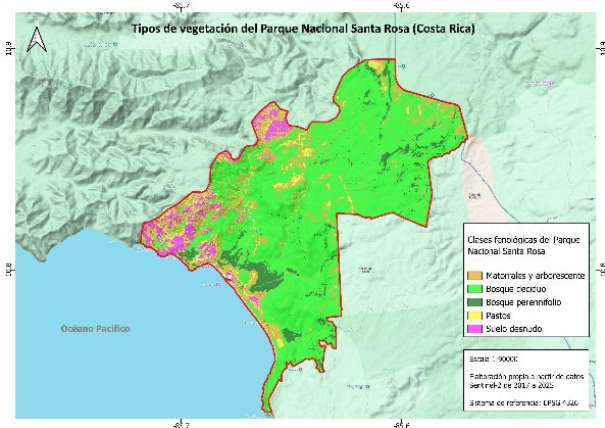


Figura 1. Área de estudio en el Parque Nacional Santa Rosa (Costa Rica).

2.2 Datos SAR Sentinel-1

Se utilizaron imágenes Sentinel-1 GRDH en banda C correspondientes al periodo 2017–2025, con polarizaciones VV y VH y órbitas ascendente y descendente. La señal fue calibrada a retrodispersión γ^0 en dB y extraída como media espacial sobre 60 parcelas homogéneas representativas de los tres ambientes de estudio. Las series temporales se suavizaron para reducir la variabilidad de corto plazo y se transformaron a ciclo anual plegado (DOY), permitiendo obtener una curva estacional media independiente del año. A partir de las polarizaciones VV y VH se calcularon índices diferenciales (VV–VH, VH–VV) para analizar la contribución relativa de mecanismos dieléctricos y estructurales. El flujo de trabajo seguido para el procesamiento de las series temporales y la derivación de métricas ecohidrológicas se muestra en la Figura 2.

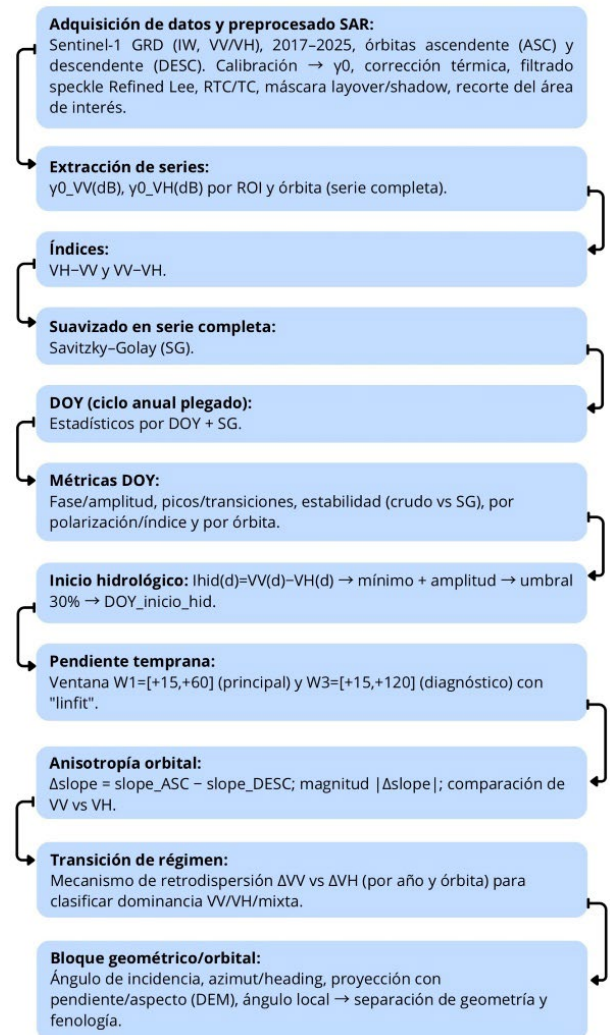


Figura 2. Flujo de trabajo para el análisis de series temporales SAR y derivación de métricas ecohidrológicas.

2.3 Creación de series temporales y métricas derivadas

Se definieron métricas temporales a partir de la dinámica de las curvas DOY con el objetivo de identificar transiciones en el régimen de retrodispersión. Entre ellas se incluyen el mínimo seco, el inicio hidrológico funcional (definido como el primer momento en que el índice VV–VH supera el 30% de su amplitud anual), las pendientes tempranas tras dicho inicio y la presencia de máximos locales.

Para analizar la estacionalidad media se transformaron las series multianuales a un ciclo anual plegado (DOY). Cada observación se asignó a su día del año (1-365) y se calcularon estadísticos por DOY obteniendo una curva anual representativa del comportamiento medio del ecosistema.

Adicionalmente, se evaluó la anisotropía entre órbitas ascendente y descendente mediante la comparación de las pendientes temporales, con el fin de detectar dependencias de la geometría de observación. Estas métricas permiten analizar cambios en los mecanismos

de dispersión radar más allá de valores absolutos, centrándose en la forma y evolución de la señal.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ciclo anual plegado permitió identificar, en el sector costero (playa Naranjo) un patrón ecohidrológico recurrente y reproducible, caracterizado por una rápida respuesta dieléctrica posterior a la recarga hídrica anual tras el inicio de las lluvias de abril. Se pudieron diferenciar sectores con mayor capacidad de almacenamiento hídrico interno mediante la persistencia de la señal dieléctrica tras el inicio de las lluvias, en el interior (Hacienda Santa Rosa).

Las curvas de ciclo anual plegado (DOY) muestran patrones estacionales consistentes en los tres ambientes analizados, con una clara respuesta tras el inicio de las lluvias asociada a cambios dieléctricos del suelo y del dosel. Sin embargo, se observan diferencias notables entre polarizaciones y órbitas. En la figura 3 se muestra las curvas DOY en polarización VH, donde se aprecia un comportamiento relativamente homogéneo entre ambientes, dominado por procesos de atenuación volumétrica.

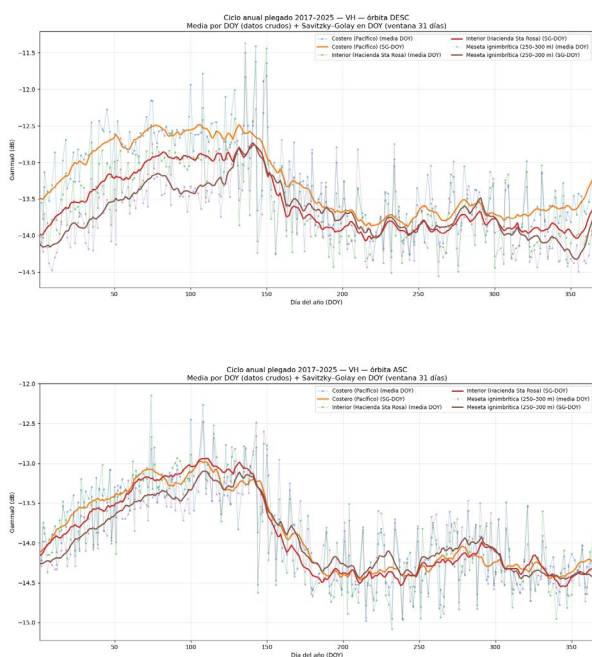


Figura 3. Ciclo anual plegado (DOY) de la retrodispersión en polarización VH para los tres ambientes analizados.

Por el contrario, en la figura 4, correspondiente a la polarización VV, se presenta una mayor variabilidad y sensibilidad a la geometría de observación, especialmente durante las fases iniciales del reverdecimiento.

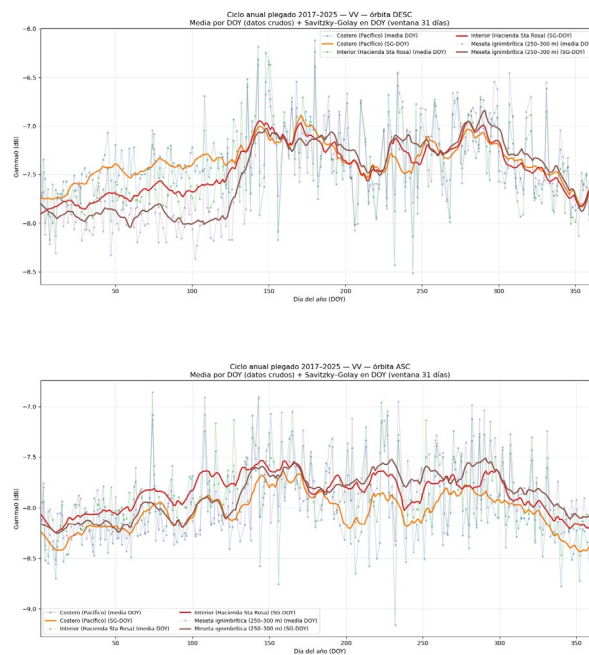


Figura 4. Ciclo anual plegado (DOY) de la retrodispersión en polarización VV para los tres ambientes analizados.

Las diferencias entre órbitas ascendente (ASC) y descendente (DESC) evidencian una fuerte anisotropía en la señal, lo que indica que la retrodispersión está condicionada por la interacción entre el estado hídrico del sistema y la geometría de observación. Esta anisotropía se manifiesta en cambios en las pendientes temporales y en la posición de los máximos de señal.

La ausencia de máximos consistentes entre polarizaciones y órbitas sugiere que los picos de retrodispersión no pueden interpretarse como eventos fenológicos estructurales. En su lugar, la señal refleja transiciones entre diferentes mecanismos de dispersión, incluyendo doble rebote suelo-tronco y atenuación volumétrica del dosel húmedo.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la señal de retrodispersión de Sentinel-1 en bosque tropical seco está dominada por el régimen eco-hidrológico y su interacción con la geometría de observación, más que por cambios estructurales directamente asociados a la fenología vegetal.

Se observa una fuerte anisotropía entre órbitas ascendente y descendente, así como diferencias entre polarizaciones, lo que indica que la señal radar responde a la coexistencia de múltiples mecanismos de dispersión dependientes del estado hídrico del sistema.

La ausencia de máximos consistentes en DOY entre órbitas y polarizaciones evidencia que los picos de retrodispersión no pueden interpretarse como eventos fenológicos robustos.

Se propone un criterio operativo para la interpretación de series temporales SAR; un evento fenológico debe

ser simultáneamente estable en DOY, independiente de la órbita y coherente entre polarizaciones.

Este enfoque permite evitar interpretaciones ecológicas erróneas y proporciona una base metodológica replicable para el análisis fenológico mediante radar en ecosistemas tropicales estacionales.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte de los estudios doctorales del primer autor, y pudo realizarse gracias al apoyo del proyecto Tecnologías en Ciencias del Patrimonio (TEC Heritage-CM, TEC-2024 / TEC-39) financiado por la convocatoria Tecnologías 2024 de la Comunidad Autónoma de Madrid (España). La investigación fue posible gracias a la participación de Joaquín Escayo Menéndez, de la Universidad Politécnica de Madrid. También fue esencial el apoyo del IUCA (*Instituto de Investigación en Ciencias Ambientales* de la Universidad de Zaragoza) y del grupo de investigación GEOFOREST, de la Universidad de Zaragoza. Finalmente los autores agradecen la colaboración del Área de Conservación Guanacaste (Costa Rica) y particularmente de su director, Roger Blanco Segura.

6. REFERENCIAS

- Doblas, J., Carneiro, A., Shimabukuro, Y., Sant'Anna, S., Aragão, L., & Pereira, F. R. S. (2020). Stabilization of Sentinel-1 SAR time-series using climate and forest structure data for early tropical deforestation detection. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *V-3*, 89-96. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-89-2020>
- Kong, D., McVicar, T. R., Xiao, M., Zhang, Y., Peña-Arancibia, J. L., Filippa, G., Xie, Y., & Gu, X. (2022). Phenofit: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing. *Methods in Ecology and Evolution*, *13*(7), 1508–1527. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13870>
- Schlund, Michael. (2025). Potential of Sentinel-1 time-series data for monitoring the phenology of European temperate forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *223*, 131-145. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.02.026>
- Soudani, K., Delpierre, N., Berveiller, D., Hmimina, G., Vincent, G., Morfín, A., & Dufrêne, É. (2021). Potential of C-band Synthetic Aperture Radar Sentinel-1 time-series for the monitoring of phenological cycles in a deciduous forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *104*, 102505. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102505>
- Rüetschi, M., Schaepman, M. E., & Small, D. (2018). Using multitemporal Sentinel-1 C-band backscatter to monitor phenology and classify deciduous and coniferous forests in northern Switzerland. *Remote Sensing*, *10*(1), 55. <https://doi.org/10.3390/rs10010055>