

# Análisis de la dinámica espaciotemporal de humedales tropicales a través de imágenes SAR Sentinel-1: caso de estudio en Colombia

Pablo Andrés Velásquez Franco<sup>¶</sup> María Eugenia Pérez González<sup>§</sup> 

## Resumen

Las imágenes Synthetic Aperture Radar (SAR) del sensor Sentinel-1 complementan las posibilidades actuales que brindan los sensores remotos de información multispectral, siendo principalmente útiles en áreas de alta nubosidad. Este estudio presenta la descripción de la dinámica espaciotemporal de un sistema de humedales tropicales denominado Ciénaga Colombia durante el periodo 2014-2021 a través de imágenes del sensor SAR Sentinel-1. Los datos se procesaron en *Google Earth Engine* (GEE) y se emplearon gráficos de cajas y bigotes para analizar la dispersión multitemporal de la retrodispersión del SAR. La lámina de agua superficial del sistema de humedales se calculó mediante los métodos de Umbrales y el Surface Water Index Extraction Model (SWIM), y se exploró su posible relación con la precipitación media anual y el El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Los resultados indican la media del tamaño de la lámina de agua superficial de 109,96 ha en el 2015 y de 334,79 ha en el 2017. Los valores calculados para el 2017 con el SWIM y el método de umbrales distan casi en el doble para el mínimo de retrodispersión —384 ha y 657 ha, respectivamente—, aunque para esa temporalidad hubo ausencia de datos SAR. La consistencia de los resultados obtenidos a través de datos SAR se validó con valores del Normalized Difference Water Index (NDWI) provenientes de imágenes Sentinel 2-1C, y muestran coherencia en lo calculado. Finalmente, desde este estudio se reconoce la necesidad de profundizar en diferentes análisis para identificar los cambios en el sistema de humedales producto de las intervenciones directas sobre la red de drenaje en el que se encuentra.

**Palabras clave:** agua superficial, cartografía, Google Earth Engine, humedal, Sistemas de Información Geográfica, radar, retrodispersión, zona tropical.

**Ideas destacadas:** artículo de investigación que explora y presenta una metodología replicable y útil para los gestores de la planificación y manejo de humedales tropicales. Se destaca la consistencia que brinda el conjunto de datos SAR de Sentinel-1 y su análisis desde la plataforma de libre acceso GEE para este tipo de estudios.



RECIBIDO: 12 DE OCTUBRE DE 2022. | EVALUADO: 26 DE ENERO DE 2022. | ACEPTADO: 28 DE DICIEMBRE DE 2022.

## CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Velásquez Franco, Pablo Andrés; Pérez González, María Eugenia. 2024. “Análisis de la dinámica espaciotemporal de humedales tropicales a través de imágenes SAR Sentinel-1: caso de estudio en Colombia”. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 33 (1): 161-178. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.105225>.

¶ Universidad Complutense de Madrid, Madrid – España. ✉ [pavelasq@ucm.es](mailto:pavelasq@ucm.es) – ORCID: 0000-0002-9529-6881.

§ Universidad Complutense de Madrid, Madrid – España. ✉ [meperez@ucm.es](mailto:meperez@ucm.es) – ORCID: 0000-0002-9416-5003.

✉ Correspondencia: Pablo Andrés Velásquez Franco - Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Geografía e Historia, Edificio B, C/ Profesor Aranguren s/n, 28040, Madrid, España.

## Spatiotemporal Dynamic Analysis of Tropical Wetlands using Sentinel-1 SAR Images: Case of Study in Colombia

### Abstract

SAR -Synthetic Aperture Radar- Sentinel-1 data complements the current possibilities offered by multispectral information, and it is mainly useful in areas of high cloudiness. This study presents the spatiotemporal dynamics of a tropical wetland system named Ciénaga Colombia from 2014 to 2021 through Sentinel-1 SAR data. The analysis is mainly done using Google Earth Engine -GEE- and boxplots were used to analyze SAR backscattering. Thresholds and SWIM -Surface Water Index Extraction Model- methods were used to calculate the surface water of the wetland system. This study also explored some possible relationships between the system surface water with precipitation and the ENSO -El Niño Southern Oscillation-. The results showed that 2015 and 2017 present the greater-lesser backscattering values (respectively), indicating mean surface water sizes of 110 ha and 334 ha. SWIM and thresholds values calculated for the lowest backscattering moment in 2017 differ almost double (384 ha and 657 ha). The consistency of the SAR data results was validated through NDWI values from Sentinel 2-1C images. Finally, this study recognizes the need to delve into different analyses to identify changes in the wetland system as a result of direct interventions on its drainage network.

**Keywords:** surface water, mapping, Google Earth Engine, wetland, radar, backscattering, Geographic Information Systems, tropical zone.

**Highlights:** research article that explores and presents a replicable and useful methodology for landscape and tropical wetland managers. The consistency and coherence provided by the Sentinel-1 SAR data and its analysis using the GEE free access platform for this type of study is highlighted.

## Análise da dinâmica espaço-temporal de zonas úmidas tropicais através de imagens SAR Sentinel-1: estudo de caso na Colômbia

### Resumo

As imagens SAR (por suas siglas em inglês Synthetic Aperture Radar) do satélite Sentinel-1 complementam as possibilidades atuais oferecidas pelo sensoriamento remoto sobre informação multiespectral, sendo úteis principalmente em áreas com alta nebulosidade. Este estudo apresenta a descrição da dinâmica espaço-temporal de um sistema de zonas húmidas tropicais conhecido como Ciénaga Colômbia durante o período 2014-2021, através de imagens do sensor Sentinel-1. Os dados foram explorados no *Google Earth Engine* (GEE) e gráficos box-and-whisker foram usados para analisar a dispersão multitemporal do retroespalhamento SAR. A lâmina de água superficial do sistema de zonas úmidas foi calculada usando os métodos Umbrais e SWIM do inglês Surface Water Index Extraction Model; e explorou-se sua possível relação com a precipitação média anual e El Niño Oscilação Sul (ENOS). Os resultados indicam uma lâmina de água superficial média de 110 ha em 2015 e 334 ha em 2017. Os valores calculados para 2017 com Umbrais e SWIM são quase o dobro (384 ha e 657 ha respectivamente). A consistência dos resultados obtidos através dos dados SAR foi validada com valores do NDWI (por suas siglas em inglês Normalized Difference Water Index) cuja fonte foram as imagens Sentinel 2-1C. Por fim, este estudo reconhece a necessidade de se aprofundar em análises diferenciadas para identificar alterações no sistema de zonas úmidas como resultado de intervenções diretas na rede de drenagem em que se encontra.

**Palavras-chave:** águas superficiais, mapeamento, Google Earth Engine, áreas úmidas, radar, retroespalhamento, sistemas de informações geográficas, zona tropical.

**Ideias destacadas:** artigo de pesquisa onde explora-se e apresenta-se uma metodologia replicável e útil para gestores de planejamento e gestão de áreas úmidas tropicais. Destaca-se a consistência proporcionada pelo conjunto de dados SAR Sentinel-1 e sua exploração na plataforma de acesso livre GEE para este tipo de estudo.

## Introducción

Los humedales se han destacado desde hace décadas por sus funciones ecológicas fundamentales, tales como regular el régimen hidrológico, ser hábitat de una fauna y flora características o ser un recurso de gran valor económico, cultural, científico y recreativo merecedor de su conservación y protección (Unesco 2022).

A estas importantes funciones se les une el reconocimiento por 172 países como ecosistemas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y la pérdida de biodiversidad; esto en el marco de la convención relativa a los humedales de importancia internacional suscrita en RAMSAR en 1971 (RAMSAR 2022).

Existe consenso sobre la importancia de los humedales, por lo que hay disponible múltiple información geoespacial que permite el monitoreo o estudio de estos ecosistemas (Carroll et ál. 2009; Santoro et ál. 2015; Pekel et ál. 2016), aunque sigue siendo insuficiente para caracterizar con detalle su heterogeneidad y variabilidad espaciotemporal (Hu et ál. 2020; Tian et ál. 2020). Sin embargo, el acceso gratuito a datos provenientes de sensores remotos y las diferentes técnicas de procesamiento en la nube de estos, aumenta las posibilidades para plantear o adoptar diferentes metodologías en torno al análisis o estudio de los humedales.

Las diversas fuentes de información teledetectada tienen una alta importancia en el monitoreo de humedales; particularmente, las de carácter multiespectral constituyen una valiosa fuente información para analizar y cartografiar la extensión de la lámina superficial de agua (Reimold y Linthurst 1975; Jensen et ál. 1987; McDonald et ál. 2011; Wang et ál. 2019), determinar la contaminación de las aguas (Pérez y García 2004), analizar la hidrología, diversidad y suelos (García, Pérez y Sans 2006; McDonald et ál. 2011), y estudiar los tipos de vegetación (Schmitt et ál. 2011). Sin embargo, las bandas de sensores multiespectrales, inclusive las infrarrojas, se ven limitadas la mayor parte del año en áreas con presencia constante de nubes que impiden registrar la superficie terrestre.

Las dificultades descritas para sensores ópticos multiespectrales sugieren la necesidad de implementar datos provenientes de imágenes de radar de apertura sintética, SAR (por sus siglas en inglés), ya que el sistema de generación de datos es independiente de las condiciones asociadas a la nubosidad o luz del día, opera las 24 horas del día y en la mayoría de condiciones climáticas. Lo anterior, hace que la información SAR sea principalmente útil en zonas tropicales.

El SAR se asocia a una plataforma con un sensor activo que transmite pulsos de radiación electromagnética que interactúan con la rugosidad de la superficie terrestre y retornan en forma de eco mediante el fenómeno denominado retrodispersión (Moreira et ál. 2013). La interacción del pulso permite obtener las características geométricas (forma, tamaño y orientación) y dieléctricas (contenido de humedad, salinidad, etc.) de la superficie o de sus elementos. La frecuencia y longitud de onda propia del pulso que emite el sensor SAR tiene una relación directa con su capacidad de penetrar capas de la atmósfera y de la cubierta superficial del suelo. Por ejemplo, las bandas P y L (ambas con baja frecuencia y amplia longitud de onda) son apropiadas para detectar o analizar el comportamiento de las láminas superficiales de agua en paisajes con cobertura forestal (Henderson y Lewis 2008; White et ál. 2015; Gulácsi y Kovács 2020), mientras que la banda C presenta resultados óptimos en humedales abiertos o con poca vegetación (Kasischke, Melack y Craig 1997; Gulácsi y Kovács 2020).

La energía electromagnética emitida por los sistemas SAR permite que se le filtre en términos de su polarización, tanto en su emisión como en su recepción. Es posible acceder a datos SAR en cuatro modos de polarización HH-HV-VH-VV, tal como se ofrece en sistemas como ALOS-Palsar (Rosenqvist et ál. 2007), o dos modos como en el caso de Sentinel-1 con polarizaciones disponibles en HV y VH (Torres et ál. 2012). El monitoreo de humedales puede realizarse desde cualquier tipo de polarización. No obstante, los valores de retrodispersión de las polarizaciones cruzadas VH-HV tienden a ser similares entre sí y de menor intensidad que los generados por co-polarizaciones HH-VV (Manjusree et ál. 2012), por lo que algunos autores consideran estas dos últimas como prometedoras en monitoreo de humedales (Kasischke y Bourgeau-Chavez 1997; Henderson y Lewis 2008; Clement, Kilsby y Moore 2018; Gulácsi y Kovács 2020).

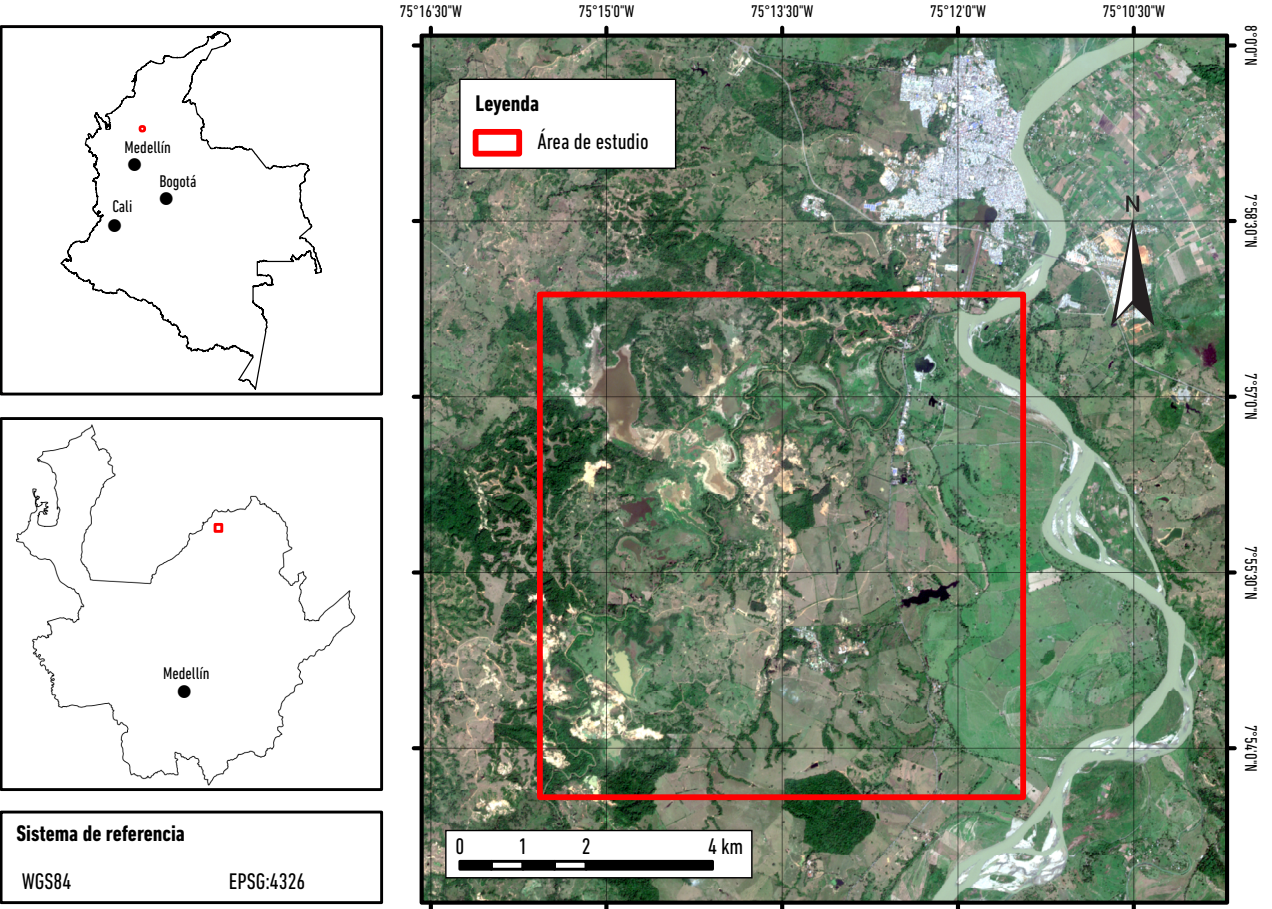
El objetivo de este estudio es describir la dinámica espaciotemporal de la lámina de agua superficial de humedales tropicales a partir del uso de las imágenes tipo SAR del sensor Sentinel-1. En particular, se estudia el sistema denominado Ciénaga Colombia (en Colombia). La elección del humedal se debe a la incertidumbre que se genera, producto de las presiones antrópicas en el entorno y en la cuenca hidrográfica en que este se encuentra. La metodología propuesta permite procesar y analizar información tipo SAR y multiespectral desde la plataforma Google Earth Engine (GEE) y empleando lenguaje de programación JavaScript.

Aquí se usa una metodología para delimitar y describir la dinámica espaciotemporal de un sistema de humedales localizado en Colombia. De tal manera que el desarrollo del documento se presenta de la siguiente manera: (i) identificación y evaluación de los conjuntos de datos espaciales indicado para el análisis; (ii) delimitación del sistema de humedales Ciénaga Colombia empleando información secundaria y el conjunto de datos Sentinel 1; (iii) determinación de la extensión de la lámina de agua superficial del sistema de humedales y sus fluctuaciones máximas y mínimas durante el periodo 2014-2021 a partir de datos SAR Sentinel-1; (iv) comparación de la extensión de la lámina de agua determinada a partir de información SAR Sentinel-1 respecto a valores de NDWI (índice de agua de

diferencia normalizada, por sus siglas en inglés) generado con datos multiespectrales de Sentinel 2-1C.

Área de estudio

El sistema de humedales Ciénaga Colombia se localiza sobre el río Man, afluente del río Cauca (desembocadura localizada en 7°57'42,96"N, 75°12'1,05"O), al norte del departamento de Antioquia (Colombia) en el municipio de Caucasia (Figura 1). De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2022a), en el espacio de estudio predominan las áreas húmedas y territorios agrícolas, y en menor representatividad bosques y áreas seminaturales.

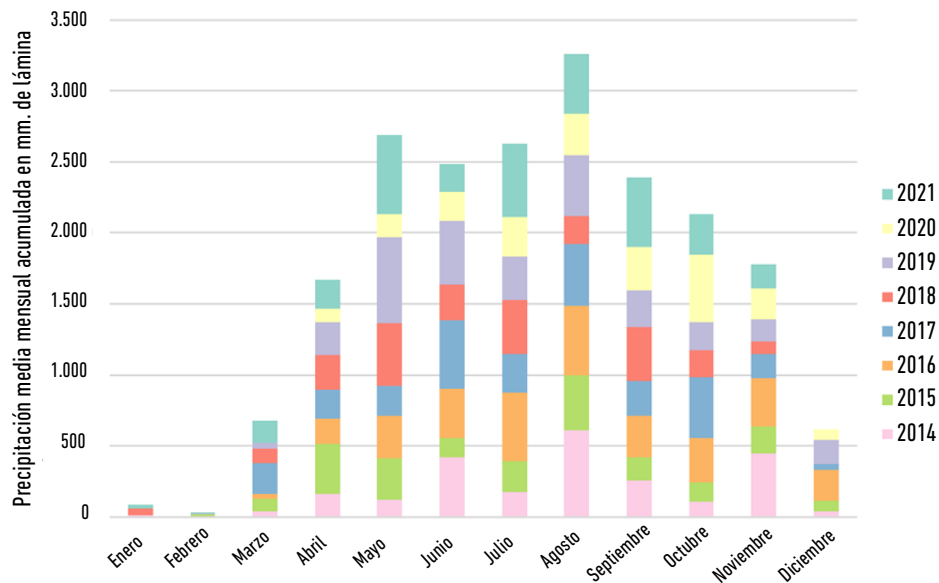


**Figura 1.** Localización general del sistema de humedales Ciénaga Colombia (recuadro rojo) en Colombia y Antioquia. Datos: elaborada a partir de imagen satelital Sentinel 2-1C (20200114T152639\_20200114T152633\_T18NVP) y cartografía base IGAC (2022).



La temperatura promedio anual de Cauca es de 29 °C (IDEAM 2022b). Datos obtenidos de la estación pluviométrica La Coquera localizada en la desembocadura del río Man (IDEAM 2022c) indican que la precipitación media total anual de los últimos ocho años es de 2.556 mm, con picos en mayo y agosto, y con temporada seca en enero y febrero (Figura 2). En la serie de años objeto de este análisis (2014-2021), el 2015 fue el de menor cantidad

de lluvia (2.048 mm) y el 2021 el de mayor (3.035 mm). Lo anterior puede relacionarse con El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), ya que durante el 2015 se presentó el Fenómeno de El Niño (fase seca del ENOS y menor precipitación en Colombia), mientras que en 2021 ocurrió el Fenómeno de La Niña (fase húmeda del ENOS y mayor precipitación en Colombia).



**Figura 2.** Precipitación media mensual multianual en la desembocadura del río Man al río Cauca.  
Fuente: elaborada a partir de IDEAM (2022a).

Si bien para el sistema de humedales Ciénaga Colombia se han impulsado diferentes iniciativas para su conservación y manejo (Conserva Colombia, Fondo Acción, The Nature Conservancy, Corantioquia y Municipio de Cauca y Fundación Grupo HTM 2015; IAvH 2022), la cercanía con el casco urbano de Cauca y el hecho de que aguas arriba se encuentren las ciudades Cali y Medellín (segunda y tercera ciudad en orden de importancia económica y demográfica de Colombia) sugieren presiones que podrían impactar negativamente su dinámica hidrológica e hidráulica.

Además, sobre el río Cauca y antes de llegar al área de estudio se construyó el proyecto de hidroenergía Hidroituango, cuyo embalse puede contener 20 millones de m<sup>3</sup> de agua y debió llenarse de manera anticipada en abril de 2018 debido a problemas técnicos de la infraestructura (ANLA 2019; EPM 2022).

## Datos y métodos

El periodo de estudio es de ocho años, entre 2014 y 2021, para el que hay disponibilidad de datos SAR Sentinel-1. El procedimiento se desarrolla en cinco etapas: (i) identificación de los datos espaciales —disponibilidad, cantidad—; (ii) delimitación del sistema de humedales Ciénaga Colombia a partir de la capa generada por Pekel et ál. (2016) y la media multianual del conjunto de datos SAR Sentinel-1C; (iii) procesamiento y análisis espaciotemporal del conjunto de datos SAR Sentinel-1C para describir la dinámica espaciotemporal de la lámina de agua superficial de ese mismo sistema de humedales; (iv) cartografía de la lámina de agua utilizando el método de umbrales (Otsu 1979) y el SWIM (agua sostenible mediante modelado integrado, siglas en inglés) (Tian et ál. 2017); y (v) evaluar la coherencia de los resultados. El procedimiento general se presenta en la Figura 3.

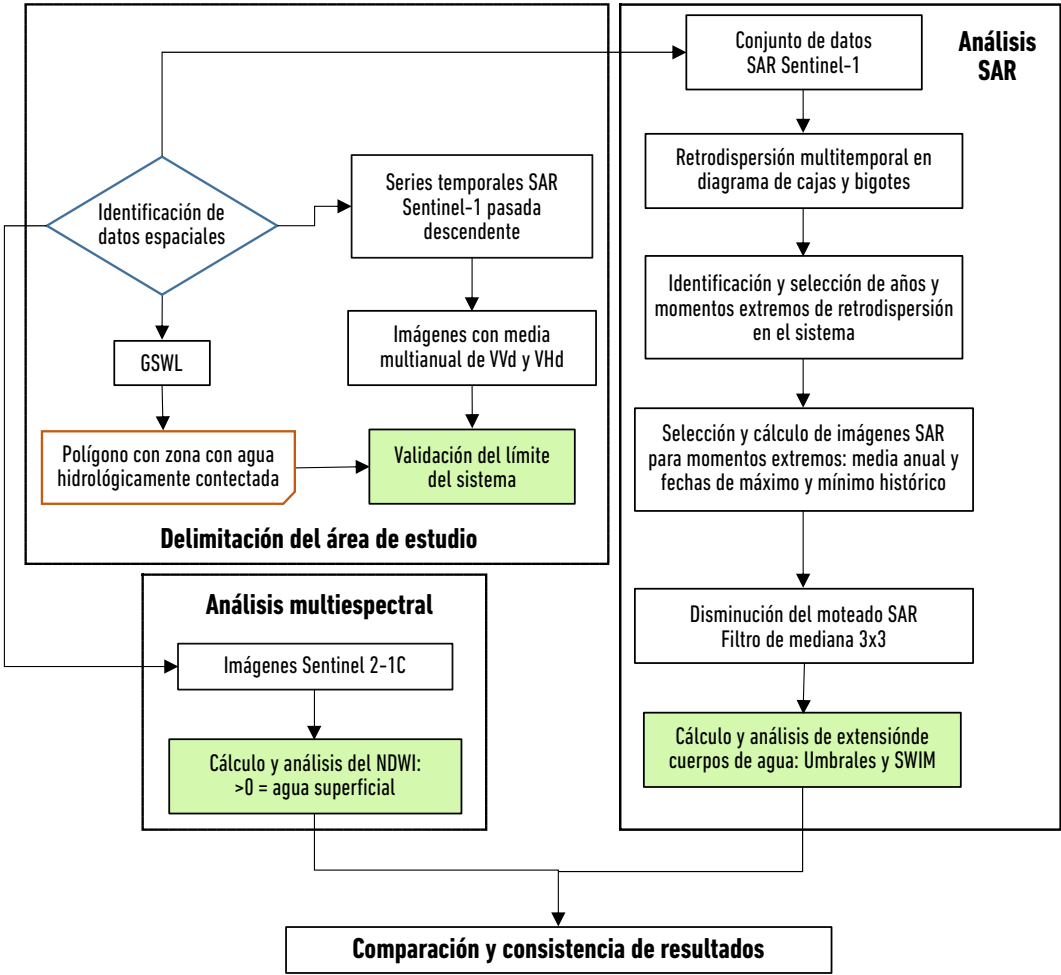


Figura 3. Procedimiento general para el análisis de la dinámica espaciotemporal del sistema de humedales Ciénaga Colombia.

### Conjunto de datos geoespaciales

El acceso y procesamiento de la información se realiza desde la plataforma GEE, la cual dispone de múltiples conjuntos de datos para su acceso y manipulación en la nube mediante lenguaje de programación JavaScript (Gorelick et ál. 2017; Muro et ál. 2019; Sahour, Kemink y O'connell 2022). En este estudio se realiza un análisis multisensor y con diferentes fuentes de datos geoespaciales (Tabla 1).

Tabla 1. Datos satelitales e información base empleada en el estudio

Datos	Descripción
Ubicación y distribución temporal de las aguas superficiales: escala global.	Localización, distribución y estadísticas temporales del agua superficial continental desde 1984 hasta 2019. Resolución espacial de 10 m. Información cartográfica generada por Pekel et ál. (2016).

Sentinel 2-1c	Información proveniente de sensor óptico multispectral. Valores de reflectancia en la superficie de la atmósfera (nivel de procesamiento 1c). Resolución espacial de 10 m.
SAR Sentinel-1C	Información proveniente de sensor tipo radar banda C. Producto GRD —del inglés Ground Range Detected— con coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^0$ ) transformado a decibelios (dB) mediante la ecuación $10 \cdot \log_{10} \sigma^0$ . Escenas en modo interferométrico y con resolución espacial de 10 m.

Datos: información obtenida desde el metadato disponible en Google Earth Engine.

La selección del nivel de procesamiento para las imágenes Sentinel 2 obedece a que la información procesada con valores de reflectancia a nivel de superficie solo se encuentra disponible a partir del 2018 en GEE. Cabe resaltar que para la ventana de estudio solo hay cinco escenas

Sentinel 2-1C disponibles para 2015 y solo una carece de nubes sobre el área de análisis.

Al contrario de las limitaciones en disponibilidad efectiva de imágenes multiespectrales Sentinel 2-1C para el área de estudio, las correspondientes SAR de Sentinel-1C ofrecen mayores posibilidades según el año, pasada y polarización (Tabla 2). Además, el ángulo de incidencia del sensor en ambas pasadas se encuentra en el rango

óptimo para la identificación de láminas de agua y maximizar su contraste con el suelo —30°-50°— (Manjusree et ál. 2012; Gulácsi y Kovács 2020). La heterogeneidad y disponibilidad de los datos SAR Sentinel-1C permiten que en esta investigación se utilicen, principalmente para los análisis, las imágenes en pasada descendente y de co-polarización —VV<sub>d</sub>—.

**Tabla 2.** Imágenes SAR Sentinel-1C disponibles hasta diciembre de 2021

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total	Ángulo
VV <sub>d</sub> *	3	15	14	29	30	31	30	29	181	38°
VH <sub>d</sub>	-	-	-	19	30	31	30	29	139	
VV <sub>a</sub> **	3	13	16	8	11	22	27	25	125	35°
VH <sub>a</sub>	1	3	8	8	11	22	27	25	105	

Datos: información obtenida desde *Google Earth Engine*.

Nota: \* d-pasada descendente del sensor Sentinel-1C. \*\* a-pasada ascendente del sensor Sentinel-1C. (-) Sin disponibilidad de imágenes.

### Delimitación del Sistema de Humedales Ciénaga Colombia

Inicialmente, el límite del sistema de humedales Ciénaga Colombia se define de acuerdo con la cartografía mundial de ubicación y distribución temporal de las aguas superficiales (Pekel et ál. 2016), con lo que se genera un polígono que contenga alta ocurrencia de agua y que guarde conectividad visual. Posteriormente, se refina el polígono empleando la media multianual de los datos SAR Sentinel-1C de pasada descendente y en ambas polarizaciones —VV<sub>d</sub> y VH<sub>d</sub>—. Este planteamiento garantiza que el área de análisis contenga la mayor cantidad coherente de datos SAR Sentinel-1C para plantear y describir la dinámica espaciotemporal de la lámina de agua superficial del sistema de humedales Ciénaga Colombia.

### Análisis espaciotemporal de datos SAR Sentinel-1c

En este estudio se analiza y describe el comportamiento espaciotemporal del sistema de humedales Ciénaga Colombia a partir de los bajos valores de retrodispersión que presenta el agua en superficie producto de su comportamiento especular. La variable principal de análisis corresponde a la co-polarización de pasada descendente —VV<sub>d</sub>—, ya que cuenta con la mayor cantidad y homogeneidad de datos (181 imágenes entre 2014 y 2021). Además, esta polarización puede generar los mejores resultados para la cartografía de cuerpos de agua (Kasischke y Bourgeau-Chavez 1997; Henderson y Lewis 2008; Clement, Kilsby

y Moore 2018; Gulácsi y Kovács 2020). El procedimiento general aquí propuesto para delimitar la lámina de agua y analizar sus variaciones espaciotemporales es el siguiente:

#### Preparación del conjunto de datos SAR Sentinel-1c

Se asignan valores umbrales a la retrodispersión del conjunto de datos SAR para disminuir los valores atípicos en los resultados posteriores. El límite inferior de los datos SAR es -32 y corresponde a los planteamientos de Manjusree et ál. (2012); el límite superior para los valores de retrodispersión es 0, dada la naturaleza logarítmica de los datos y según resultados obtenidos mediante un análisis preliminar para un polígono en el casco urbano de Caucasia (VV<sub>d</sub>:  $\mu$  -5.57, Std. Dev 2.1; VH:  $\mu$  -11.99, Std. Dev 2.11).

#### Análisis del comportamiento multianual del conjunto de datos SAR Sentinel-1c

Teniendo como referencia el polígono obtenido del sistema de humedales, en GEE se generan y descargan en formato CSV (valores separados por coma; siglas en inglés) los valores de la media multianuales de retrodispersión para el conjunto de datos SAR Sentinel-1C. Los valores se utilizan para generar diagramas de cajas y bigotes, presentar la distribución estadística de los datos e identificar los años y momentos extremos de retrodispersión. Lo anterior se relaciona con los de menor y mayor cantidad de lámina de agua del sistema de humedales Ciénaga Colombia.

Las polarizaciones VH<sub>d</sub> y VV<sub>a</sub> sirven para analizar la coherencia de los resultados obtenidos a partir de VV<sub>d</sub>.

Finalmente, se presenta la distribución de la retrodispersión media de las series  $VV_d$  para los años identificados como extremos y que a su vez representan la mayor y menor cantidad de lámina de agua superficial en ese sistema de humedales.

#### Generación de escenas SAR de valor medio

Producto del análisis de los diagramas de cajas y bigotes se generan escenas que representan la media anual de retrodispersión para los años o momentos con la mayor y menor cantidad de esta. Estos datos permiten cartografiar la lámina de agua media máxima y media mínima del mismo sistema. Las escenas para este cálculo se obtienen de las polarizaciones  $VV_d$  y  $VH_d$ .

#### Disminución del ruido tipo moteado en escenas SAR Sentinel-1c

Todas las imágenes de tipo SAR presentan un efecto denominado moteado, que al disminuirlo facilita la interpretación de la escena (Moreira et ál. 2013). Para atenuar este efecto, en este estudio se usa un filtro de mediana con *kernel* de 3x3 y de una iteración, procedimiento acorde con los resultados de diversos autores (Tian et ál. 2017, 2020; Passaro, Müller y Dettmering 2018; Wang et ál. 2019; Bhatt et ál. 2021). Esta técnica solo se aplica en las escenas que se utilizan para cuantificar la lámina de agua superficial en los diferentes momentos del análisis.

#### Cálculo de la lámina de agua superficial del sistema de humedales Ciénaga Colombia a través del método de umbrales

Este es el método más empleado para cartografiar agua superficial a partir de datos SAR (White et ál. 2015) y tiene como base el planteamiento de Otsu (1979). Se implementa segmentando el histograma de las escenas medias SAR Sentinel-1c correspondientes a los años con el comportamiento medio máximo y mínimo de retrodispersión, así como para las escenas correspondientes a las fechas del máximo y mínimo histórico del sistema. Esta técnica permite la separación de los datos del histograma en dos clases e identificar los valores correspondientes a superficies con agua y sin agua (Clinton 2017; Sivaranjan 2020). La aplicación de este método únicamente requiere una banda de tipo SAR, que para este estudio se utiliza en todos los casos: la de co-polarización en pasada descendente — $VV_d$ —.

#### Cálculo de la lámina de agua superficial del sistema de humedales Ciénaga Colombia a través del método swim

Tian et ál. (2017) plantean una ecuación para calcular láminas de agua cuya base es la combinación lineal entre

las polarizaciones  $VV$ - $VH$  de datos SAR. Estos autores sugieren que el método puede ser más confiable que aquellos en los que la base es la generación de umbrales. SWIM con valores superiores a 0,2 se asocian con presencia de agua. La ecuación del SWIM es la siguiente:

$$swim = 0,1747 * vv + 0,0082 * vh * vv + 0,0023 * vv^2 - 0,0015vh^2 + 0,1904$$

En este estudio el SWIM se genera combinando la media anual de ambas polarizaciones de la pasada descendente, por lo que su obtención está condicionada a la disponibilidad de datos.

#### Validación con datos ópticos multiespectrales Sentinel 2-1c

La información multiespectral genera resultados óptimos en la cartografía y análisis de sistemas de humedales (Reimold y Linthurst 1975; García, Pérez y Sanz 2006; Du et ál. 2016; Mejia, Soto y Martínez 2019; Mejia, Torres-Bejarano y Martínez 2022); sin embargo, la recurrente nubosidad que se presenta sobre el área de estudio disminuye la disponibilidad de datos disponibles. Por ejemplo, para el área colombiana analizada solo hay una escena Sentinel 2-1c libre de nubes por año en 2015 y 2017; ambos casos del mes de diciembre.

El hecho anterior dificulta plantear un análisis de la variabilidad temporal del sistema de humedales empleando como base las imágenes ópticas multiespectrales, lo cual se supera al utilizar aquellas de tipo SAR Sentinel-1c. No obstante, en este estudio se pretende validar la coherencia de los resultados obtenidos con SAR usando información disponible de Sentinel 2.

La validación se plantea ajustándose a la disponibilidad y al método empleado por otros autores (Clement, Kilsby y Moore 2018; Gulácsi y Kovács 2020; Tian et ál. 2020), en el que el NDWI (McFeeters 1996) se genera para cartografiar los cuerpos de agua y los resultados se comparan con aquellos obtenidos a partir de datos SAR. La ecuación del NDWI es la siguiente:

$$ndwi = (g - nir) / (g + nir)$$

$$ndwi = (g - nir) / (g + nir)$$

El NDWI corresponde a la relación que se presenta entre las bandas  $B_{3(g)}$  y  $B_{8(nir)}$  (bandas para el caso de Sentinel 2), en las que el producto final cuenta con una resolución espacial de 10m. Valores positivos del NDWI indican la presencia de agua (McFeeters 1996). Estudios recientes han empleado el índice como base para sus análisis (Eid et ál. 2020; Guha, Govil y Besoya 2020; Özelkan 2020; Shashikant et ál. 2021), aunque pueden generarse sobreestimaciones (Xu 2006; Du 2016).

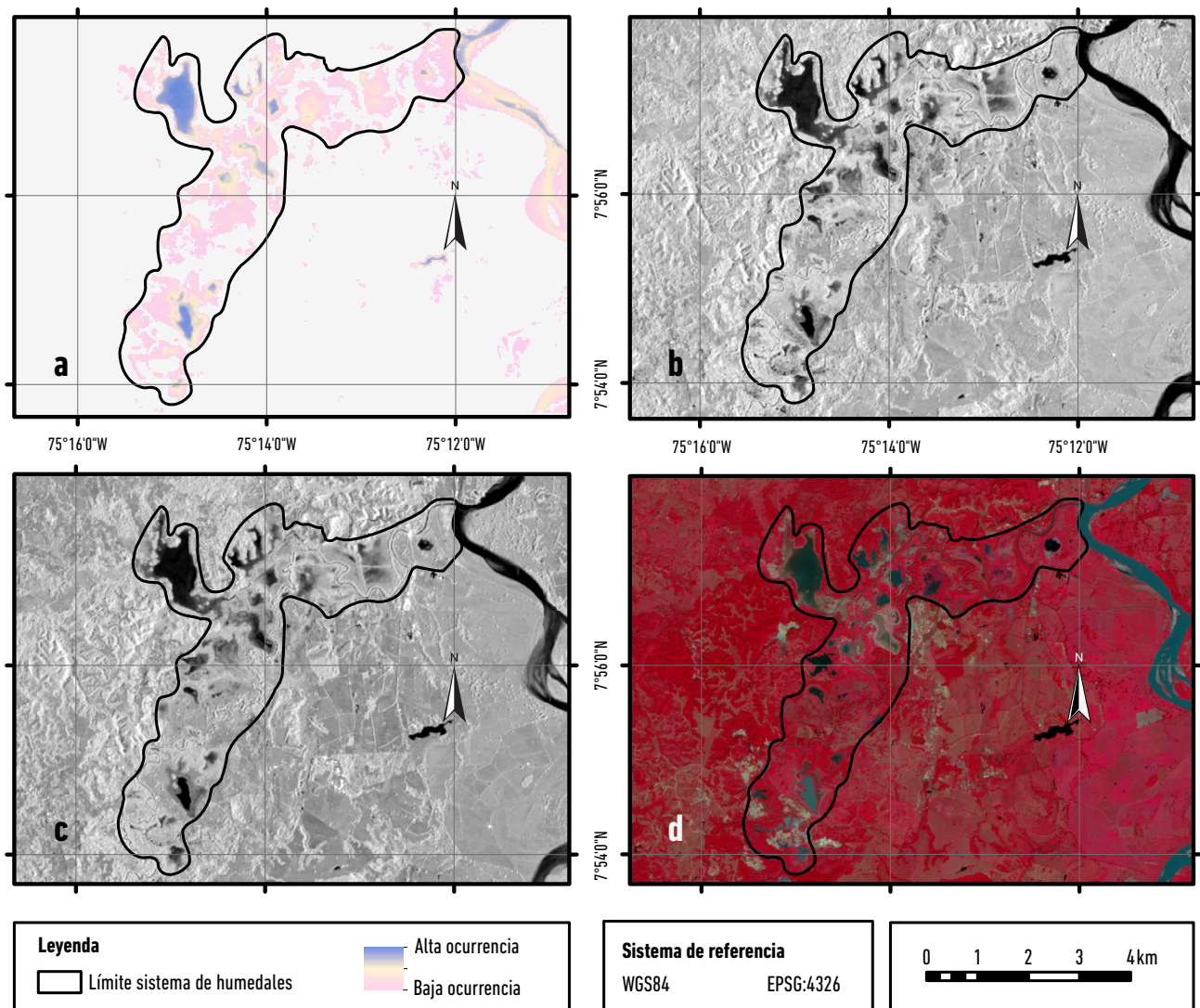


## Resultados y discusión

### Delimitación del Sistema de Humedales Ciénaga Colombia

El sistema de humedales Ciénaga Colombia conforma un área de 1.618,40 ha, con elevación promedio de 48 m.s.n.m. ( $\sigma$  4.52) y de pendientes casi nulas ( $\mu$  3.66°,  $\sigma$  3.14) de acuerdo con The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) propuesto por Farr et ál. (2007). En

su interior se identifican zonas con alta ocurrencia de agua y conectadas entre sí (Pekel et ál. 2016) (Figura 4a). Las superficies medias inundadas según la retrodispersión de ambas polarizaciones de la pasada descendente del sensor SAR Sentinel-1C concuerdan en extensión (Figuras 4b y 4c) y permiten alcanzar mayor detalle en la delimitación del sistema de humedales. Se encuentra consistente el polígono final del sistema de humedales al superponerlo sobre información multiespectral (Figura 4d).



**Figura 4.** Información utilizada para la delimitación del Sistema de Humedales Ciénaga Colombia.

Datos: elaborada a partir de (a) cartografía generada por Pekel et ál. (2016), (b) valor medio multianual de  $VV_d$ , (c) valor medio multianual de  $VH_d$ , (d) combinación RGB 8-4-3 de imagen Sentinel 2-1C (20200114T152639\_20200114T152633\_T18NVP).

### Análisis espaciotemporal SAR Sentinel-1c

Las variaciones en la cuantía y extensión de la lámina de agua del sistema de humedales aquí tratado entre 2014 y 2021, obtenidas a partir de datos SAR de las distintas pasadas del sensor Sentinel-1C, reflejan cambios interanuales e intra anuales notables. Estas variaciones se identifican gracias a la distribución de la dispersión multitemporal de la media de retrodispersión en los diagramas de cajas y bigotes, en los que son evidentes los años con los valores extremos: 2015 y 2017 para las series  $VV_d$  (Figura 5).

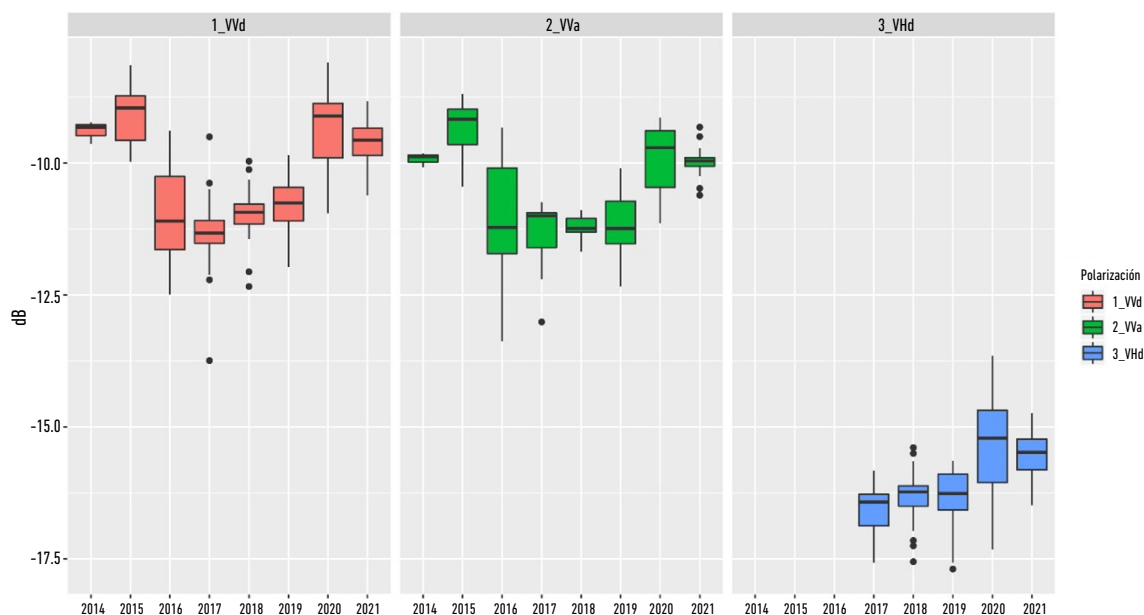
El 2015, caracterizado por la incidencia del fenómeno de El Niño, muestra los valores históricos más altos de retrodispersión, que sugieren que fue la anualidad con la menor cantidad de agua superficial en el sistema de humedales Ciénaga Colombia. Lo contrario ocurre para el 2017, en el que la dispersión de la retrodispersión en el diagrama de cajas y bigotes se presenta de forma simétrica y con los valores más bajos de las series analizadas; un par de valores se encuentran fuera del ámbito del diagrama y uno corresponde a la fecha de menor retrodispersión histórica en el sistema de humedales. Para destacar, en el último trimestre de 2017 se presentó el fenómeno de La Niña, lo que representa mayor cantidad de precipitación en el país.

Las series  $VV_a$  presentan distribuciones similares a las co-polarizaciones en pasada descendente; en ellas el 2015 tiene los valores más altos de retrodispersión, y con

dispersión relativamente asimétrica hacia el cuarto superior del diagrama. Pese a la gran similitud entre las series  $VV_d$  y  $VV_a$ , esta última presenta sus valores mínimos en 2016, los cuales se distribuyen con amplia asimetría y representan la gran variabilidad intra anual de la lámina de agua superficial en el sistema de humedales para este año.

La serie  $VH_d$  solo está disponible a partir de 2017. En su conjunto, esta presenta los valores más bajos de retrodispersión y se ajusta a los resultados obtenidos por Manjusree et ál. (2012). Visualmente, los diagramas de cajas y bigotes lucen similares a los presentados por  $VV_d$ , coincidiendo en ambas el 2017 como el año con valores más bajos de retrodispersión.

Al contrastar los resultados con los planteamientos de Manjusree et ál. (2012), las tres series de diagramas de cajas y bigotes presentan valores correspondientes a zonas inundadas, en su conjunto superiores en 2015 e inferiores en 2017. Algunos autores indican que las zonas inundadas pueden presentar valores entre -22,4 y -12,9 dB en polarizaciones  $VV$ , y de -24,25 hasta -17,4 dB en polarizaciones  $VH$  (Uddin, Matin y Meyer 2019); no obstante, y bajo la premisa de que los diagramas incluyen en su cálculo valores de áreas no inundadas, los años de menor y mayor extensión de lámina de agua superficial en este sistema de humedales son 2015 y 2017 respectivamente. El Anexo 1 presenta una imagen en combinación de falso color que permite explorar los cambios entre ambas anualidades.



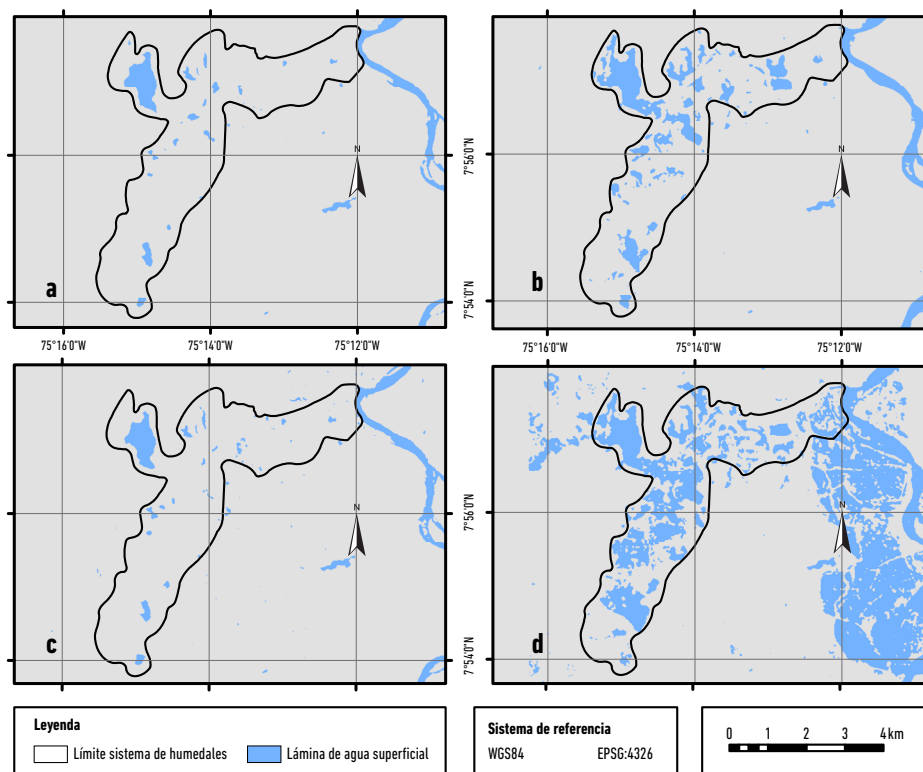
**Figura 5.** Diagramas de cajas y bigotes para los valores de retrodispersión de las series SAR Sentinel-1C: años 2014 a 2021. Escala en decibelios (dB). Datos: gráficos con mediana inclusiva, obtenidos a partir de las series de retrodispersión media mensual-anual-multianual SAR Sentinel-1C para el sistema de humedales Ciénaga Colombia.

La distribución mensual anual de la retrodispersión en la serie  $VV_d$  para 2015 varía considerablemente respecto a la de 2017, indicando marcadas diferencias en la extensión de lámina de agua superficial casi todo el año. Sobresalen dos momentos que representan los máximos y mínimos históricos del sistema de humedales (el Anexo 2 presenta con detalle este comportamiento). En ambos años, marzo es el momento de máxima retrodispersión y por consiguiente el mes de menor tamaño de lámina de agua superficial. Para 2015 la lámina de agua superficial puede verse impactada por la menor cantidad de lluvias que se presenta en el país, debido a la consolidación y alta incidencia del fenómeno de El Niño en ese año. Por otra parte, el mínimo de retrodispersión histórica del conjunto de datos  $VV_d$  se presenta en mayo de 2017 y se asume que para esa fecha el sistema de humedales alcanza su mayor tamaño de lámina de agua superficial. Debe resaltarse que hay 14 escenas menos disponibles para el 2015 (15) con respecto al 2017 (29).

Al emplear la propuesta de Otsu (1979) fue factible identificar y cuantificar las dos clases de superficies en las escenas contrastadas: sistema de humedales con y sin lámina de agua superficial. Este método de segmentación se

aplicó a los histogramas correspondientes de las escenas con la media de la serie  $VV_d$  que representan el comportamiento máximo y mínimo de retrodispersión (2015-2017), y también para las escenas asociadas a la fecha o momento de valor atípico o extremo (marzo de 2015 y mayo de 2017). En todos los casos, el valor de segmentación de los histogramas correspondió a los rangos presentados por diferentes autores (Manjusree et ál. 2012; Uddin, Matin y Meyer 2019) y fueron: media 2015, -14,96; media 2017, -14,98; marzo 2015, -12,89; mayo 2017, -14,97 —valores para  $VV_d$ —.

La lámina de agua superficial del sistema de humedales Ciénaga Colombia obtenida a partir de los anteriores umbrales y de acuerdo con la propuesta de Otsu (1979) oscila entre un área mínima de 103,40 ha en 2015 y un área máxima de 657,02 ha en el 2017 (Figura 6). La media del tamaño en 2017 es 3 veces la presentada en 2015 (334,79 ha y 109,96 ha), lo que denota la amplia variabilidad interanual del sistema. Para resaltar: el valor máximo de retrodispersión y mínimo de lámina de agua superficial coinciden con la consolidación del fenómeno de El Niño en Colombia.

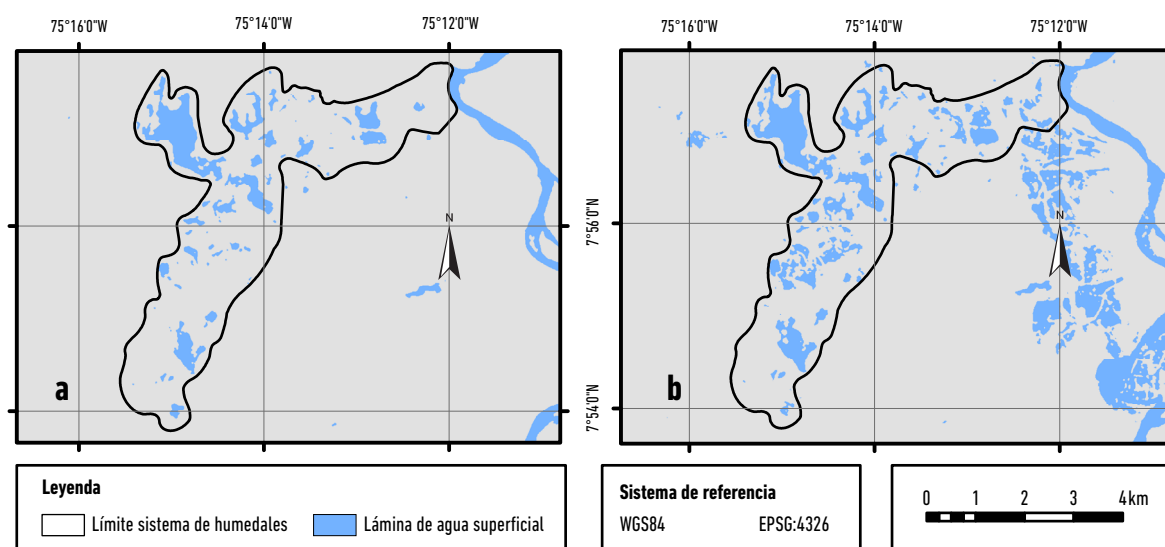


**Figura 6.** Lámina de agua superficial calculada a partir del método de umbrales (Otsu 1979). (a) lámina de agua superficial de 109,96 ha, (b) lámina de agua superficial de 334,79 ha, (c) lámina de agua superficial de 103,40 ha, (d) lámina de agua superficial de 657,02 ha. Datos: elaborada a partir de imagen Sentinel-1C; (a) valor medio de retrodispersión para el 2015, (b) valor medio de retrodispersión para el 2017, (c) escena del 20 de marzo de 2015, (d) escena del 14 de mayo de 2017.

*Nota:* las imágenes Sentinel-1C en esta etapa recibieron el filtro de mediana con *kernel* de 3x3 para disminuir el moteado.

Al utilizar el SWIM, método propuesto por Tian et al. (2017), los resultados quedan condicionados por la disponibilidad de escenas SAR Sentinel-1C; puntualmente, vacíos de información de la serie  $VH_d$ . En este estudio solo se cuantifica el SWIM para el 2017, año que cuenta con datos en ambas polarizaciones. Así las cosas, la media del tamaño de lámina de agua superficial del sistema de

humedales Ciénaga Colombia para 2017 es de 277,94 ha y de 383,78 ha para el momento de mínima retrodispersión histórica (Figura 7a y b). Sin embargo, el segundo valor está condicionado por el vacío de datos  $VH_d$  para mayo 14, y el SWIM debió calcularse con escenas del 26 del mismo mes.



**Figura 7.** Lámina de agua superficial calculada a partir del SWIM.

Datos: elaborada a partir de imágenes Sentinel-1C  $VV_d$  y  $VH_d$ ; (a) valor medio de retrodispersión series de 2017, (b) escenas del 26 de mayo de 2017.

## Validación

Aunque hubo poca disponibilidad de datos ópticos multiespectrales Sentinel 2-1C, fue posible calcular el NDWI para el 24 y 18 de diciembre de 2015 y 2017 respectivamente (Figura 8 a y b). El tamaño de la lámina de agua superficial obtenida con este método fue de 72,17 ha para 2015 y de 366,49 ha para 2017.

## Conclusiones

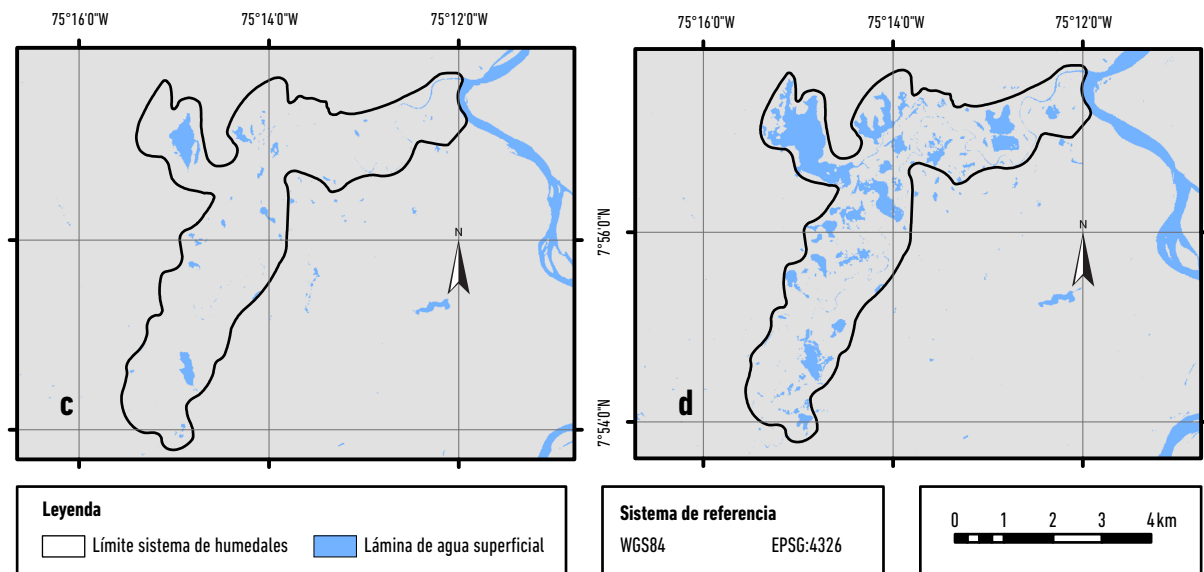
Este artículo explora las variaciones espaciotemporales de la lámina de agua superficial en un sistema de humedales tropicales a partir datos SAR Sentinel-1C durante el periodo de 2014 a 2021. En general, las series multitemporales de la retrodispersión SAR Sentinel-1C ( $VV_d$ ,  $VH_d$  y  $VV_a$ ) presentan valores similares entre sí. En su conjunto, la retrodispersión es más baja en 2017 y más alta en 2015; ambas sirven para calcular las variaciones en la lámina superficial de agua del sistema de humedales. Debe resaltarse que el área analizada tiene múltiples coberturas terrestres, por lo que los valores de la retrodispersión

calculados incluyen características geométricas y dieléctricas adicionales a las relacionadas con cuerpos de agua.

El sistema de humedales Ciénaga Colombia muestra gran variabilidad interanual de su lámina de agua, con una media de 110 ha en el año de mayor retrodispersión (2015) y de 334 ha en el menor (2017). La variación intra anual en 2015 es baja; 6,4 % es el cambio total respecto a la media. Lo contrario ocurre en el 2017, en el que los valores de mayo casi duplican los valores de la media y se alcanza el límite máximo del sistema de humedales (657 ha).

El cálculo del área de la lámina de agua superficial a partir del método de segmentación de histogramas empleando umbrales permite describir de forma cuantitativa y visual la dinámica espaciotemporal del sistema de humedales Ciénaga Colombia, incluidos los momentos extremos de las temporalidades influenciadas por el ENOS (fenómeno de El Niño o de La Niña). Este método resulta muy útil, ya que solo requiere una banda de tipo SAR para su aplicación. Por otra parte, la media del tamaño de la lámina de agua del sistema de humedales para





**Figura 8.** Lámina de agua superficial a partir del NDWI, 2015 y 2017.  
 Datos: elaborada a partir de NDWI > 0; (a) diciembre de 2015, (b) diciembre de 2017.

2017 obtenida a partir del SWIM es similar a la calculada con el método de segmentación del histograma y coherente con el resultado de la validación con el NDWI; este resultado es contrario a lo que ocurre con el momento máximo histórico del sistema, en el que ambos resultados ofrecen cifras bastante diferentes (383,78 ha y 657 ha). Es conveniente utilizar el SWIM únicamente cuando hay disponibilidad de ambas polarizaciones —VV VH— para la misma pasada del sensor.

Es cierto que el NDWI aporta resultados bastante precisos para medir láminas de agua superficial y su variabilidad espaciotemporal en otros humedales de Colombia (Yagüe 2005; Mejía, Torres-Bejarano y Martínez 2022) o de otros continentes (Du et ál. 2016; Yang et ál. 2017), pero los resultados se ven condicionados por la disponibilidad de series multispectrales sin nubes. Ante la ausencia de información útil proveniente de los sensores ópticos multispectrales (Sentinel 2 o Landsat), resulta inviable contrastar o comparar con detalle los resultados obtenidos a partir de datos SAR Sentinel-1C con series de NDWI; no obstante, ambos métodos presentan zonas con agua que mantienen una alta coherencia con respecto a su ubicación y tamaño.

Esta investigación pone de manifiesto la fiabilidad de los datos SAR Sentinel-1C para plantear las diferentes variaciones espaciotemporales de la lámina de agua superficial en un sistema de humedales tropical en Colombia. Los métodos presentados son replicables y los pueden emplear los diferentes agentes responsables

del manejo y gestión de este tipo de ecosistemas. Además, el desarrollo de códigos específicos para la obtención de valores cuantitativos y cualitativos de la superficie inundada usando datos SAR Sentinel-1C supone un avance destacado para el monitoreo y seguimiento de humedales casi en cualquier zona de Colombia, pues no está limitado por las condiciones atmosféricas de cada región.

Finalmente, desde este estudio se reconoce la necesidad de profundizar en la posible correlación de la precipitación de la zona con la dinámica del sistema de humedales, así como de identificar los diferentes cambios en el sistema de humedales producto de las intervenciones en el cauce del río Cauca, y también aquella correspondiente al cierre de las compuertas y llenado del embalse Hidroituango en 2018.

## Referencias

- ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales). 2019. "Proyecto de interés en seguimiento PIS-Proyecto Hidroeléctrico Pescadero Ituango". Consultado el 2 de noviembre de 2023. <https://www.anla.gov.co/proyectos-de-interes-en-seguimiento/pis-proyecto-hidroelectrico-pescadero-ituango>
- Bhatt, CM, Amitesh Gupta, Arijit Roy, Prohelika Dalal y Prakash Chauhan. 2021. "Geospatial Analysis of September, 2019 Floods in the Lower Gangetic Plains of Bihar Using Multi-Temporal Satellites and River Gauge Data". *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 12 (1): 84-102. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1861113>

- Carroll, M. L., J. R. Townshend, C. M. DiMiceli, P. Noojipady y R. A. Sohlberg. 2009. "A New Global Raster Water Mask at 250m Resolution". *International Journal of Digital Earth* 2 (4): 291-308. <https://doi.org/10.1080/17538940902951401>
- Clement, Miles A., Chris G. Kilsby y Philip Moore. 2018. "Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Flood Mapping Using Change Detection". *Journal of Flood Risk Management* 11 (2): 152-168. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12303>
- Clinton, Nicholas. 2017. "Otsu's Method for Image Segmentation by Google Earth and Earth Engine". Consultado el 10 de agosto de 2022. <https://medium.com/google-earth/otsus-method-for-image-segmentation-f5c48f405e>
- Conserva Colombia, Fondo Acción, The Nature Conservancy, Corantioquia y Municipio de Cauca y Fundación Grupo HTM. 2015. *Propuesta para la declaratoria del Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI). Complejo de humedales Ciénaga Colombia, municipios de Cacasía y Cáceres - Antioquia*. Medellín. Consultado el 5 de agosto de 2022. [https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/AREAS%20PROTEGIDAS/AIR-NR\\_CV\\_1010\\_2013.pdf](https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/AREAS%20PROTEGIDAS/AIR-NR_CV_1010_2013.pdf)
- Du, Yun, Yihang Zhang, Feng Ling, Qunming Wang, Wenbo Li y Xiaodong Li. 2016. "Water Bodies' Mapping From Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the Swir Band". *Remote Sensing* 8 (4): 354. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>
- Eid, Asmaa Nasser Mohamed, C. O. Olatubara, T. A. Ewemoje, Mohamed Talaat El-Hennawy y Haitham Farouk. 2020. "Inland Wetland Time-Series Digital Change Detection Based on SAVI and NDWI Indices: Wadi El-Rayan Lakes, Egypt". *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 19: 100347. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100347>
- BPM (Empresas Públicas de Medellín). 2022. "Hidroituango, Proyecto Hidroeléctrico Ituango". Consultado el 2 de noviembre de 2023. <https://www.hidroituango.com.co/caracteristicas-del-proyecto/>
- Farr, Tom G., Paul A. Rosen, Edward Caro, Robert Crippen, Riley Duren, Scott Hensley, Michael Kobrick, Mimi Paller, Ernesto Rodriguez, Ladislav Roth, David Seal, Scott Shaffer, Joanne Shimada, Jeffrey Umland, Marian Werner, Michael Oskin, Douglas Burbank y Douglas Alsdorf. 2007. "The Shuttle Radar Topography Mission". *Reviews of Geophysics* 45 (2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- García Rodríguez, María Pilar, María Eugenia Pérez González y Juan José Sanz Donaire. 2006. "Variabilidad Hídrica y Edáfica de Humedales Peninsulares Interiores a Partir de Imágenes Landsat (TM y ETM)". *Estudios Geográficos* 67 (260): 57-78. <https://doi.org/10.3989/egеоgr.2006.i260.43>
- Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau y Rebecca Moore. 2017. "Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone". *Remote Sensing of Environment* 202 (Diciembre): 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guha, Subhanil, Himanshu Govil y Monika Besoya. 2020. "An Investigation on Seasonal Variability Between LST and NDWI in an Urban Environment Using Landsat Satellite Data". *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 11 (1): 1319-1345. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1789762>
- Gulácsi, András y Ferenc Kovács. 2020. "Sentinel-1-Imagery-Based High-Resolution Water Cover Detection on Wetlands, Aided by Google Earth Engine". *Remote Sensing* 12 (10): 1614. <https://doi.org/10.3390/rs12101614>
- Henderson, Floyd M. y Anthony J. Lewis. 2008. "Radar Detection of Wetland Ecosystems: A Review". *International Journal of Remote Sensing* 29 (20): 5809-5835. <https://doi.org/10.1080/01431160801958405>
- Hu, Shunshi, Jianxin Qin, Jinchang Ren, Huimin Zhao, Jie Ren y Haoran Hong. 2020. "Automatic Extraction of Water Inundation Areas Using Sentinel-1 Data for Large Plain Areas". *Remote Sensing* 12 (2): 243. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/2/243#>
- IAVH (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt). 2022. "Criterios para la delimitación de los humedales de Colombia". Consultado el 20 de septiembre de 2022. <http://www.humboldt.org.co/es/i2d/item/560-criterios-para-la-delimitacion-de-los-humedales-de-colombia>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2022a. "Capa cobertura de la tierra 100K Periodo 2018". Servidor Cartográfico. Consultado el 15 de septiembre de 2022. <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2022b. "Clima". Archivo Excel. Consultado el 15 de septiembre de 2022. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2022c. "Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos" Servidor Cartográfico. Consultado el 15 de septiembre de 2022. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2022. "Datos Abiertos Cartografía y Geografía GEOPORTAL". Consultado el 2 de noviembre de 2023. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- Jensen, Jhon. R, Elijah W. Ramsey, Halkard E. Jr Mackey, Eric J Christensen y Rebecca R Sharitz. 1987. "Inland Wetland

- Change Detection Using Aircraft MSS Data". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53 (5): 521-29.
- Kasischke, Eric S. y Laura L. Bourgeau-Chavez. 1997. "Monitoring South Florida Wetlands Using ERS-1 SAR Imagery". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63 (3): 281-291.
- Kasischke, Eric S., John M. Melack y M. Craig Dobson. 1997. "The Use of Imaging Radars for Ecological Applications - A Review". *Remote Sensing of Environment* 59 (2): 141-156. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00148-4)
- Manjusree, Panchagnula, L. Prasanna Kumar, Chandra Mohan Bhatt, Goru Srinivasa Rao y Veerubhotla Bhanumurthy. 2012. "Optimization of Threshold Ranges for Rapid Flood Inundation Mapping by Evaluating Backscatter Profiles of High Incidence Angle SAR Images". *International Journal of Disaster Risk Science* 3: 113-122. <https://doi.org/10.1007/s13753-012-0011-5>
- McDonald, Kyle C., B. Chapman, Erika Podest, Ronny Schroeder, Sarah Flores, Karen Willacy, Mahta Moghaddam, Jane Whitcomb, Laura Hess y John S. Kimball. 2011. "Monitoring Inundated Wetlands Ecosystems with Satellite Microwave Remote Sensing in Support of Earth System Science Research". *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring*, Sydney, Australia. Del 10 al 15 de abril de 2011.
- McFeeters, S. K. 1996. "The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features". *International Journal of Remote Sensing* 17 (7): 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mejía Ávila, Doris, Viviana Cecilia Soto Barrera y Zoraya Martínez Lara. 2019. "Spatio-Temporal Modelling of Wetland Ecosystems Using Landsat Time Series: Case of the Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC)- Córdoba- Colombia". *Annals of GIS* 25 (3): 231-245. <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1617347>
- Mejía Ávila, Doris, Franklin Torres-Bejarano y Zoraya Martínez Lara. 2022. "Spectral Indices for Estimating Total Dissolved Solids in Freshwater Wetlands Using Semi-Empirical Models. A Case Study of Guartinaja and Momil Wetlands". *International Journal of Remote Sensing* 43 (6): 2156-2184. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2057205>
- Moreira, Alberto, Pau Prats-iraola, Marwan Younis, Gerhard Krieger, Irena Hajnsek y Konstantinos P. Papathanassiou. 2013. "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 1 (1): 6-43. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
- Muro Martín, Javier, Adrian Strauch, Eleni Fitoka, Maria Tompoulidou y Frank Thonfeld. 2019. "Mapping Wetland Dynamics with SAR-Based Change Detection in the Cloud". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 16 (10): 1536-1539. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2903596>
- Otsu, Nobuyuki. 1979. "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9 (1): 62-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Özelkan, Emre. 2020. "Water Body Detection Analysis Using NDWI Indices Derived from Landsat-8 OLI". *Polish Journal of Environmental Studies* 29 (2): 1759-1769. <https://doi.org/10.15244/pjoes/110447>
- Passaro, Marcello, Felix L. Müller y Denise Dettmering. 2018. "Lead Detection Using Cryosat-2 Delay-Doppler Processing and Sentinel-1 SAR Images". *Advances in Space Research* 62 (6): 1610-1625. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.011>
- Pekel, Jean-François, Andrew Cottam, Noel Gorelick y Alan S. Belward. 2016. "High-Resolution Mapping of Global Surface Water and Its Long-Term Changes". *Nature* 540 (7633): 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Pérez González, María Eugenia y María Pilar García Rodríguez. 2004. "Análisis de la contaminación hídrica en humedales de ambiente semiárido aplicando teledetección (La Mancha, 1992-2001)". *Estudios Geográficos* 65 (254): 101-119. <https://doi.org/10.3989/egеоgr.2004.i254.193>
- RAMSAR. 2022. "The Convention on Wetlands, La Convención sobre los Humedales". Consultado el 2 de noviembre de 2023. <https://www.ramsar.org/es>
- Reimold, Robert J. y Rick A. Linthurst. 1975. "Use of Remote Sensing for Mapping Wetlands". *Transportation Engineering Journal of ASCE* 101 (2): 189-198. <https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000497>
- Rosenqvist, Ake, Masanobu Shimada, Norimasa Ito y Manabu Watanabe. 2007. "ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (11): 3307-3316. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.901027>
- Sahour, Hossein, Kaylan M. Kemink y Jessica O'connell. 2022. "Integrating SAR and Optical Remote Sensing for Conservation-Targeted Wetlands Mapping". *Remote Sensing* 14 (1): 159. <https://doi.org/10.3390/rs14010159>
- Santoro, Maurizio, Urs Wegmüller, Céline Lamarche, Sophie Bontemps, Pierre Defourny y Olivier Arino. 2015. "Strengths and Weaknesses of Multi-Year Envisat ASAR Backscatter Measurements to Map Permanent Open Water Bodies at Global Scale". *Remote Sensing of Environment* 171: 185-201. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.031>
- Schmitt, Andreas, Brian Brisco, Shannon Kaya, Achim Roth y A. Mueller. 2011. "Wetland Monitoring with Polarimetric SAR Change Detection Methods". *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE) - The*

- GEOS Era: Towards Operational Environmental Monitoring*, Sydney, Australia. Del 10 al 15 de abril de 2011.
- Shashikant, Veena, Abdul Rashid Mohamed Shariff, Aimrun Wayayok, Rowshon Kamal, Yang Ping Lee y Wataru Takeuchi. 2021. "Utilizing TVDI and NDWI to Classify Severity of Agricultural Drought in Chuping, Malaysia". *Agronomy* 11 (6). <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/6/1243#>
- Sivaranjan, Raja. 2020. "Automatic Water Extent Mapping from Sentinel-1 SAR Using Otsu's Method". Consultado el 5 de agosto de 2022. <https://trajasivaranjan92.medium.com/automatic-water-extent-mapping-from-sentinel-1-sar-using-otsus-method-d2728d099e97>
- Tian, Haifeng, Wang Li, Mingquan Wu, Ni Huang, Guodong Li, Xiang Li y Zheng Niu. 2017. "Dynamic Monitoring of the Largest Freshwater Lake in China Using a New Water Index Derived from High Spatiotemporal Resolution Sentinel-1A Data". *Remote Sensing* 9 (6): 521. <https://doi.org/10.3390/rs9060521>
- Tian, Haifeng, Jian Wang, Jie Pei, Yaochen Qin, Lijun Zhang y Yongjiu Wang. 2020. "High Spatiotemporal Resolution Mapping of Surface Water in the Southwest Poyang Lake and Its Responses to Vclimate Oscillations". *Sensors* 20 (17): 4872. <https://doi.org/10.3390/s20174872>
- Torres, Ramon, Paul Snoeij, Dirk Geudtner, David Bibby, Malcolm Davidson, Evert Attema, Pierre Potin, Björn Rommen, Nicolas Floury, Mike Brown, Ignacio Navas Traver, Patrick Deghayé, Berthyl Duesmann, Betlem Rosich, Nuno Miranda, Claudio Bruno, Michelangelo L'Abbate, Renato Croci, Andrea Pietropaolo, Markus Huchler y Friedhelm Rostan. 2012. "GMES Sentinel-1 Mission". *Remote Sensing of Environment* 120: 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Uddin, Kabir, Mir A. Matin y Franz J. Meyer. 2019. "Operational Flood Mapping Using Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Images: A Case Study from Bangladesh". *Remote Sensing* 11 (13). <https://doi.org/10.3390/rs11131581>
- Unesco (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2022. "World Heritage Centre - World Heritage and Ramsar Convention on Wetlands". Consultado el 2 de noviembre de 2023. <https://whc.unesco.org/en/ramsar/>
- Wang, Jingzhe, Jianli Ding, Guannan Li, Jing Liang, Danlin Yu, Tayierjiang Aishan, Fang Zhang, Jinming Yang, Aierzuna Abulimiti y Jie Liu. 2019. "Dynamic Detection of Water Surface Area of Ebinur Lake Using Multi-Source Satellite Data (Landsat and Sentinel-1A) and Its Responses to Changing Environment". *Catena* 177: 189-201. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.020>
- White, Lori, Brian Brisco, Mohammed Dabboor, Andreas Schmitt y Andrew Pratt. 2015. "A Collection of SAR Methodologies for Monitoring Wetlands". *Remote Sensing* 7 (6): 7615-7645. <https://doi.org/10.3390/rs70607615>
- Xu, Hanqiu. 2006. "Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery". *International Journal of Remote Sensing* 27 (14): 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yagüe, Julia. 2005. "Multitemporal Remote Sensing of the Outburst of Three Aquatic Weeds in the Fúquene Lagoon, Colombia". *International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*, Biloxi, MS, USA: 44-48. <https://doi.org/10.1109/AMTRSI.2005.1469837>
- Yang, Xiucheng, Shanshan Zhao, Xuebin Qin, Na Zhao y Li-gang Liang. 2017. "Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening". *Remote Sensing* 9 (6): 596. <https://doi.org/10.3390/rs9060596>

### Pablo Andrés Velásquez Franco

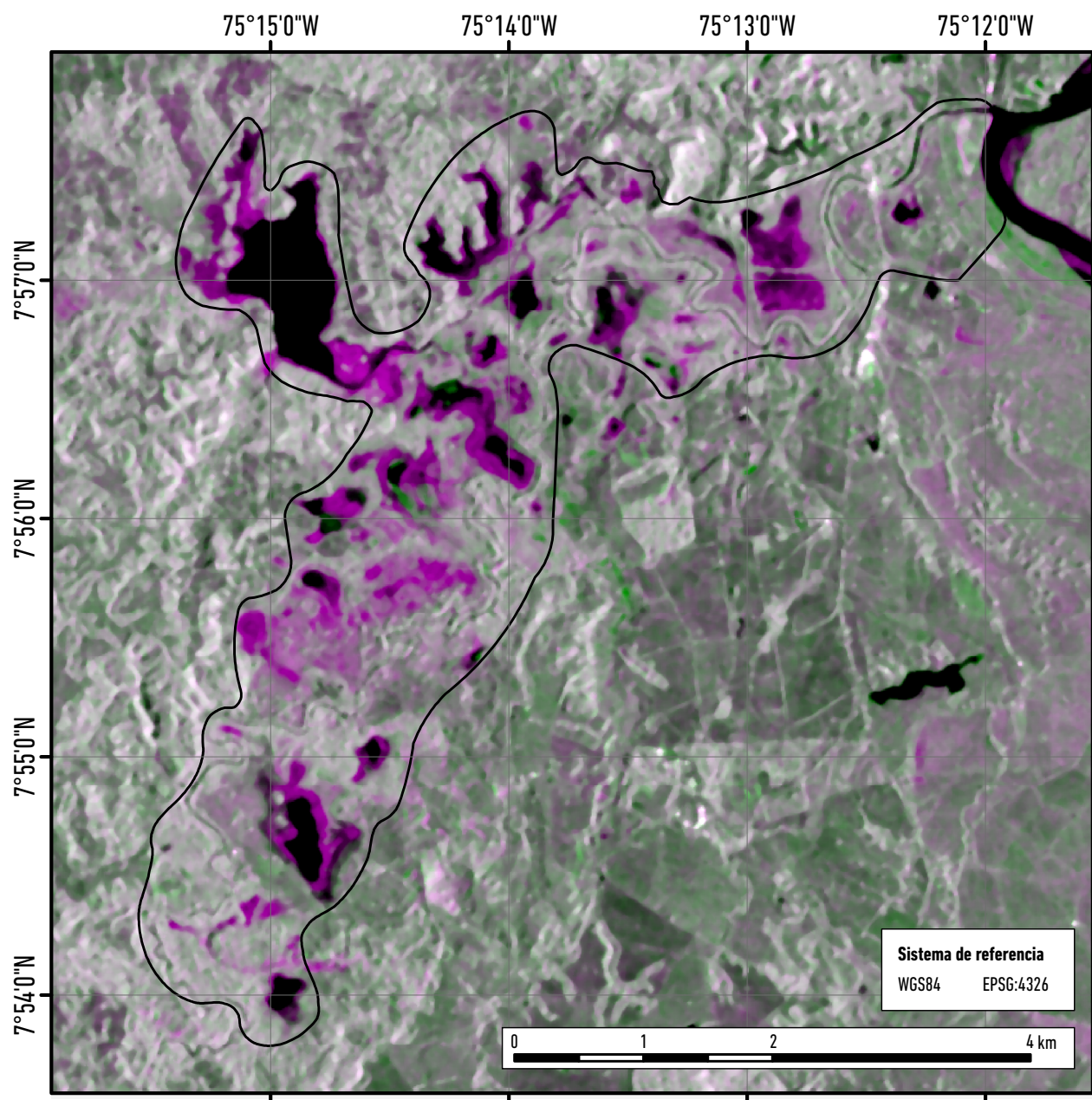
Ingeniero Forestal, especialista y magíster en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Estudiante de doctorado en Geografía en la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Línea de investigación en Teledetección y Cambio Global.

### María Eugenia Pérez González

Doctora en Geografía por la Universidad Complutense de Madrid y actualmente Profesora Titular de la misma universidad. Miembro del Grupo de Investigación de la UCM Teledetección y Cambio Global.

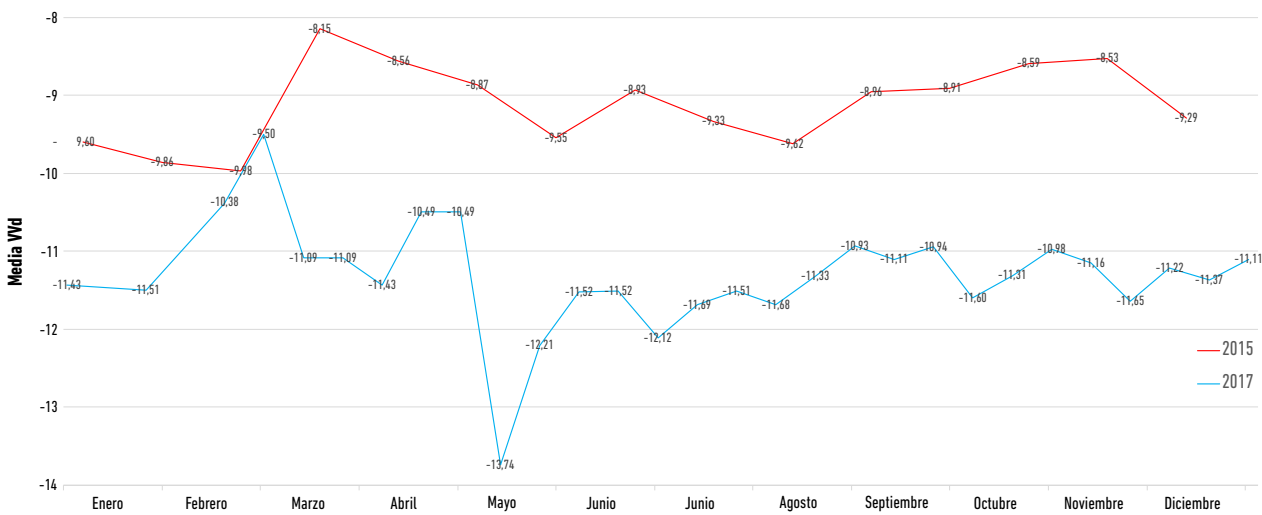


## Anexos



**Anexo 1.** Combinación SAR en falso color.

*Nota:* La combinación en falso color entre las escenas de valor medio sar Sentinel-1 de co-polarización vvd para los años 2015 y 2017 permite fotointerpretar e identificar las áreas con mayores cambios en el sistema de humedales. La escena se construye empleando R-Media 2015, G-Media 2017, B- media 2015. Los tonos morados y magenta resaltan los altos valores de retrodispersión del 2015 y los bajos de 2017. Las escenas de valor medio reciben el filtro de mediana con kernel de 3x3 para disminuir el moteado.



**Anexo 2.** Distribución de la retrodispersión media, 2015 y 2017.  
Datos: elaborado a partir de imágenes SAR Sentinel-1; media para los datos disponibles por mes para 2015 y 2017 de la polarización vvd. Nota: las imágenes Sentinel-1 en esta etapa no recibieron el filtro de mediana con kernel de 3x3 para disminuir el moteado.