

Dinámica espaciotemporal del agua superficial en sistemas de humedales tropicales usando datos de radar Sentinel-1

Spatiotemporal dynamics of surface water in tropical wetlands systems using Sentinel-1 radar data

Pablo Andrés Velásquez-Franco   ^a

Juan Felipe Franco-Gaviria  ^b

María Eugenia Pérez-González  ^a

^a Universidad Complutense de Madrid, España

^b Tecnológico de Antioquia, Colombia

Recibido: enero 16, 2024

Aceptado: mayo 27, 2024

Publicado en línea: agosto 30, 2024

<https://doi.org/10.21068/2539200X.1235>



Resumen

Este estudio se centra en el análisis multitemporal de la lámina de agua superficial en dos humedales: uno ubicado en un área protegida y el otro altamente antropizado por las presiones de su entorno. La metodología se basa en el uso de datos obtenidos mediante sensores de radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar - SAR) de la misión Sentinel-1. El procesamiento de datos SAR se realizó principalmente en Google Earth Engine (GEE). Los resultados revelan comportamientos similares a lo largo del tiempo en ambos sistemas de humedales, con mayor variabilidad estacional y estocástica en el humedal mejor conservado. Además, se observan considerables variaciones en el tamaño de la lámina de agua superficial en momentos de mínima y máxima retrodispersión, llegando a cambiar hasta cinco veces su tamaño. En conclusión, los datos SAR proporcionan información suficiente para comprender las dinámicas de estos paisajes, siendo particularmente valiosos en la región tropical, donde la constante presencia de nubes limita el uso de sensores ópticos.

Palabras clave: humedal, lámina de agua superficial, retrodispersión, sensores remotos, umbral.

Abstract

This study focuses on the multitemporal analysis of surface water in two nearby wetlands: One is situated within a protected area, while the other is in a highly anthropized zone subject to significant environmental pressures. The methodology is based on the use of data obtained through Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors from the Sentinel-1 mission. Most of the SAR data processing was conducted in Google Earth Engine (GEE). The results reveal similar behaviors over time in both wetland systems, with greater seasonal and stochastic variability in the better-conserved wetland. Additionally, significant variations in the size of the water surface were observed during periods of minimum and maximum backscatter, with changes of up to five times its size. In conclusion, SAR data provides sufficient information to understand the dynamics of these landscapes, being particularly valuable in regions like Colombia, where the constant presence of clouds limits the use of optical sensors.

Keywords: wetland, surface water extent, backscatter, remote sensing, threshold.

Introducción

Hay consenso mundial acerca de la importancia ecológica, social y económica de los humedales (Zedler & Kercher, 2005; Barbier, 2011; Betancur et al., 2017). Estos ecosistemas son tan relevantes que cuentan con un tratado a escala mundial, que se conoce como la Convención Ramsar, cuyo objetivo principal es promover y garantizar su preservación y uso sostenible (Ramsar Convention Secretariat, 1971). A 2023 hay 172 países comprometidos con dicha Convención, con 2494 humedales incluidos en la categoría de protección Ramsar (<https://www.ramsar.org>).

Colombia, como signatario de la Convención desde 1998, ha designado en su territorio 11 áreas como humedales Ramsar y ha generado la política necesaria para la planificación, gestión y preservación de estos ecosistemas (Ministerio de Medio Ambiente, 2001). En su componente técnico, en el país sobresalen las investigaciones realizadas por Estupiñán et al. (2015) y Quiñones et al. (2016), quienes emplearon datos generados con sensores de radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar - SAR) para mapear las zonas inundadas en el territorio continental colombiano. Ambos trabajos sirvieron como cimiento para la identificación y mapeo de más de 306 000 km² de humedales continentales (Flórez et al., 2016). Las contribuciones anteriores se han consolidado como referencias indispensables sobre

estos ecosistemas, principalmente porque su metodología incluye el uso de datos de SAR.

Este estudio tiene como finalidad el análisis y la descripción de la dinámica espaciotemporal de la lámina de agua superficial en sistemas de humedales tropicales utilizando datos de SAR de la misión espacial Sentinel-1 liderada por la Agencia Espacial Europea (Torres et al., 2012). Los sistemas corresponden a dos paisajes ubicados en el norte de Colombia, departamento de Antioquia, en las cuencas de los ríos Cauca y Nechí, ambos en estado de conservación contrastantes: uno presenta alta presión antrópica, por localizarse en cercanías a un centro poblado densamente habitado, mientras que el otro pertenece al sistema nacional de áreas protegidas (SINAP), debido a su alta integridad ecológica. La selección de estas áreas se justifica por su relevancia para el entorno y la posible relación entre ambas, producto de su proximidad e interacción con el río Cauca. Gran parte del procesamiento de datos de SAR se realizó a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017).

El documento detalla la metodología empleada, de la siguiente manera: 1) identificación y evaluación de los conjuntos de datos espaciales para el análisis, 2) obtención de datos de SAR, 3) análisis de las series temporales y determinación de la extensión lámina de agua superficial máxima y mínima en ambos sistemas de humedales, y 4) validación de resultados

utilizando la información generada por Flórez et al. (2016).

Metodología

Área de estudio

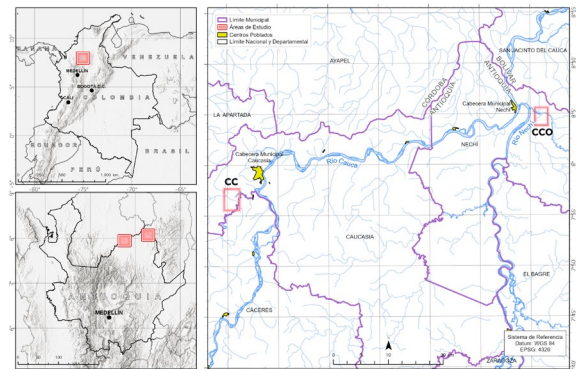
El estudio se centra en dos sistemas de humedales ubicados en la región Panzenú, departamento de Antioquia, Colombia: ciénaga Colombia (CC) ($7^{\circ}57'42,96''$ N, $75^{\circ}12'1,05''$ O) y ciénagas de Corrales y El Ocho (CCO) ($8^{\circ}4'31,19''$ N, $74^{\circ}44'9,99''$ O) (Figura 1). Estas son zonas de recarga directa y contribuyen con agua subterránea a los acuíferos (Betancur et al., 2009). El paisaje en los dos sistemas es llano y de baja elevación (Farr et al., 2007): CC tiene una elevación promedio de 51,24 msnm y pendientes promedio de $3,51^{\circ}$, mientras que CCO presenta una elevación promedio de 37,98 msnm y pendientes de $4,89^{\circ}$.

La temperatura media anual de la región es de $27,6^{\circ}\text{C}$ y la precipitación media anual varía entre 2500 y 4500 mm. Lo anterior corresponde a clima cálido y presenta variaciones mínimas no mayores de 3°C a lo largo del año para un mismo lugar (Ideam, 2005). El régimen estacional de lluvias sigue un patrón unimodal con un periodo de lluvias entre abril y noviembre, con valores máximos de ~ 380 mm en el mes de agosto; y una temporada seca de diciembre a marzo, con un mínimo de 25 mm para el mes de febrero (Zapata et al., 2013). La estación de lluvias en la zona de estudio está influenciada por la zona de convergencia intertropical (ZCIT), durante el verano boreal (Mestas et al., 2007). En el invierno boreal, la migración al sur de la ZCIT se asocia con las condiciones secas de la región. El comportamiento de la precipitación en las épocas de anomalía climática asociadas a las fases de Oscilación del Sur (ENOS) ubican esta zona de Colombia como una región en la que el comportamiento de la precipitación es normal, con déficits y excesos solamente para las fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña) del fenómeno (Betancur et al., 2009).

El estado de conservación varía entre los sistemas. CC está sometido a una mayor presión antrópica debido

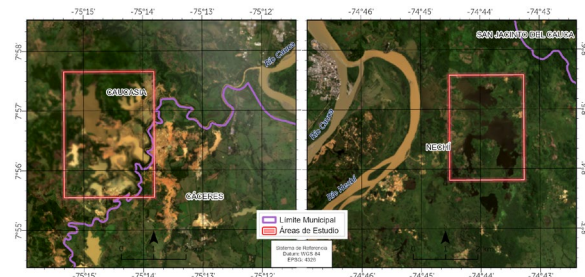
a su proximidad al centro urbano del municipio de Caucaasia y a que, aguas arriba del río Cauca, se construyó la presa del embalse Hidroituango, con capacidad hasta de 20 millones de m^3 de agua (ANLA, 2019; EPM, 2022). CCO hace parte de un área protegida de categoría Distrito de Regional de Manejo Integrado (PNNC, 2023), lo que implica que sea un paisaje más conservado. Al fotointerpretar una imagen de alta resolución de Planet de julio de 2023 (Planet, 2023), es posible validar que en CC dominan las zonas mineras y algunos parches de bosques, mientras que en CCO sobresalen bosques o de vegetación en estado de sucesión avanzado (Figura 2).

Figura 1. Localización de las áreas de estudio.



Notas. Cada recuadro rojo representa un sistema de humedales: ciénaga Colombia, en el municipio de Caucaasia, y ciénagas de Corrales y El Ocho, en el municipio de Nechí.

Figura 2. Áreas de estudio, julio de 2023.



Datos de SAR misión Sentinel-1

Los sensores de SAR cuentan con un sistema activo de longitudes de onda suficientemente largas como para penetrar las nubes. Esto permite obtener datos de la superficie terrestre incluso en días nubosos, lo que hace que muchos autores consideren esta tecnología la más útil en tales condiciones (Moreira et al., 2013; Yan et al., 2015; Markert et al., 2020). Esta característica es especialmente relevante en la región tropical donde se encuentra Colombia, en la que la nubosidad es común e impide la conformación de amplias series de datos espectrales.

La menor frecuencia y mayor longitud de onda de la energía que se emite desde un SAR comúnmente se relacionan con las bandas P y L (Moreira et al., 2013). La banda L es capaz de penetrar el dosel e interactuar con características del terreno y permite estudiar con detalle el agua en superficie (Estupiñán et al., 2015; Flórez et al., 2016; Quiñones et al., 2016). La banda C es de menor capacidad de penetración que las anteriores, aunque también presenta óptimos resultados en la cartografía de humedales abiertos o con poca vegetación (Kasischke & Bourgeau, 1997; Kasischke et al., 1997; Henderson & Lewis, 2008; Manjusree et al., 2012; Clement et al., 2018; Gulácsi & Kovács, 2020).

El fenómeno por el cual una porción de la energía de una onda electromagnética emitida por un SAR se refleja o dispersa hacia la dirección de la fuente original se conoce como retrodispersión, y la orientación del campo eléctrico de dichas ondas se refiere a polarización. Hay emisiones con polarización horizontal (H) o vertical (V), con recepciones en alguna de ellas, no necesariamente en la que se emite la energía. Por lo tanto, es posible acceder a datos en cuatro modos de polarización HH-HV-VH-VV, aunque todo depende del SAR. Otros aspectos y características de los sistemas de SAR están ampliamente tratados en Moreira et al. (2013) y en Hanjsek y Desnos (2021).

Gracias a su disponibilidad y aplicabilidad, en este estudio se emplean los datos de la misión Sentinel-1, la cual obedece a una constelación de dos satélites

puestos en funcionamiento entre 2014 y 2016 que generan imágenes SAR de banda C (Torres et al., 2012). La información de Sentinel-1 se encuentra actualizada y disponible en el Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>) o en los catálogos de GEE, en donde cuenta con un preprocesamiento.

La configuración de los satélites de la misión que presenta la mayor cantidad y homogeneidad de datos para el área de estudio es de órbita descendente y en polarización -VV- (Tabla 1), la cual es considerada por algunos autores como prometedora en monitoreo de humedales (Kasischke & Bourgeau, 1997; Kasischke et al., 1997; Henderson & Lewis, 2008; Manjusree et al., 2012; Clement et al., 2018; Gulácsi & Kovács, 2020). Además, el ángulo de incidencia del sensor del SAR sobre ambos sistemas se encuentra en el rango óptimo (30° a 50°) para identificar y analizar láminas de agua superficial (Manjusree et al., 2012; Gulácsi & Kovács, 2020). Los dos sistemas de humedales están en la misma huella del sensor de SAR.

Tabla 1. Escenas Sentinel-1 disponibles para los sistemas de humedales.

Órbita	Escenas disponibles	Valor medio del ángulo CC	Valor medio del ángulo CCO
Ascendente	166	38,14	41,67
Descendente	224	35,12	31,47

Notas. CC = ciénaga Colombia; CCO = ciénagas Corrales y El Ocho.

Procesamiento

Los datos de SAR corresponden al periodo de enero de 2014 a julio de 2023. El acceso y procesamiento de estos se realiza desde la plataforma GEE, en donde se encuentran disponibles y preprocesados con las herramientas de Sentinel (ESA, 2023), del tipo Ground Range Detected (GRD) y en coeficiente de retrodispersión (σ°) en decibelios (dB) escalados mediante la ecuación ($10\log_{10}(x)$). Las escenas se encuentran en modo interferométrico y con

resolución espacial de 10 m. La gestión de los datos para esta investigación incluye lo siguiente:

Asignación de umbrales de los datos de SAR

Se asigna -32 como el límite inferior acorde a los planteamientos de [Manjusree et al. \(2012\)](#), con límite superior de 0, dada la naturaleza logarítmica de los datos.

Generación de polígonos para el procesamiento de la serie de datos de SAR

Se definen áreas donde sean fotointerpretables el agua y otro tipo de cobertura terrestre empleando como escena base el percentil 25 de los datos de SAR en polarización VV. La implementación de los polígonos garantiza la obtención de un histograma bimodal (necesario para designar áreas con lámina de agua superficial), así como la inclusión de píxeles asociados a agua en los cálculos de la media de retrodispersión multitemporal.

Disminución del ruido en escenas de SAR

Las escenas presentan un efecto característico de moteado o de sal-y-pimienta (*speckle*), que impacta negativamente los datos. Este ruido se disminuye empleando un filtro de mediana con un grano (*kernel*) de 3 x 3 y una iteración acorde a los resultados de diversos autores ([Tian et al., 2017](#); [Tian et al., 2020](#); [Passaro et al., 2018](#); [Bhatt et al., 2019](#); [Velásquez & Pérez, 2024](#)).

Descomposición de series de tiempo

Se realiza para determinar las tendencias mensuales en la retrodispersión. Inicialmente empleamos la función "Decompose" incluida en el paquete base R Stats, el cual realiza una descomposición estacional clásica mediante medias móviles. La función produce gráficos con la serie temporal descompuesta dividida en componentes de tendencia (interanual), estacional (intraanual, mensual) e irregular (error) ([Kendall et al., 1983](#)). Esta función primero calcula el componente de tendencia utilizando promedios móviles. El componente estacional se calcula promediando para cada unidad de tiempo (mes) los periodos generales (años) y se centra. Luego, el componente de error se calcula eliminando los

componentes de tendencia y estacional de la serie temporal original. La descomposición de las series de tiempo se realiza en el software R versión 4.0.5 ([R Core Team, 2021](#)).

Cuantificación de la lámina de agua superficial

Se realiza para los momentos de mínima y máxima retrodispersión en ambos sistemas de humedales. El cálculo con el método de umbrales ([White et al., 2015](#)), que tiene como base el planteamiento de [Otsu et al. \(1979\)](#). Lo anterior corresponde a la segmentación en dos clases del histograma de las escenas de SAR para identificar los valores asociados a superficies con agua y sin agua. Esta metodología fue empleada por [Velásquez y Pérez \(2024\)](#) con óptimos resultados para la zona.

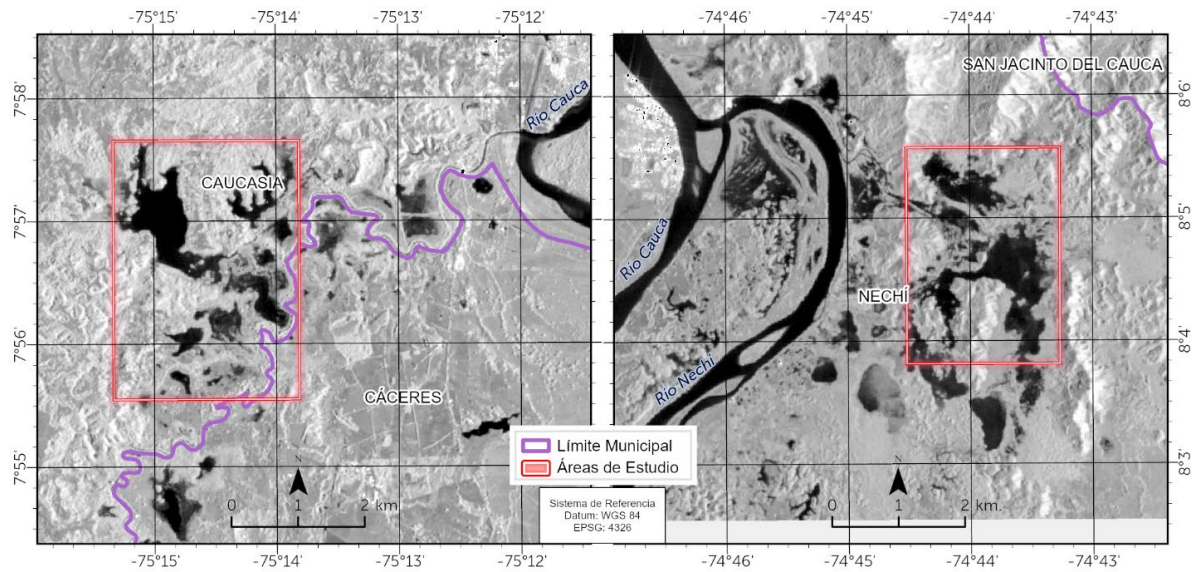
Validación

Colombia ha logrado identificar espacialmente sus sistemas de humedales continentales bajo la dirección del Instituto Humboldt. Los estudios realizados por [Estupiñán et al. \(2015\)](#), [Flórez et al. \(2016\)](#) y [Quiñones et al. \(2016\)](#) han proporcionado la información necesaria para mapear estos ecosistemas en cinco categorías: Permanente Abierto, Permanente Bajo Dosel, Temporal, Potencial Medio y Potencial Bajo. Los datos utilizados en estos estudios provienen de SAR en banda L. En este contexto, se propone validar los resultados mediante la cuantificación de las áreas presentes en las categorías de Permanente y Temporal; se excluyen del análisis las categorías Potencial Medio y Potencial Bajo debido a las variables empleadas para su cálculo, las cuales no son consideradas en este estudio.

Resultados

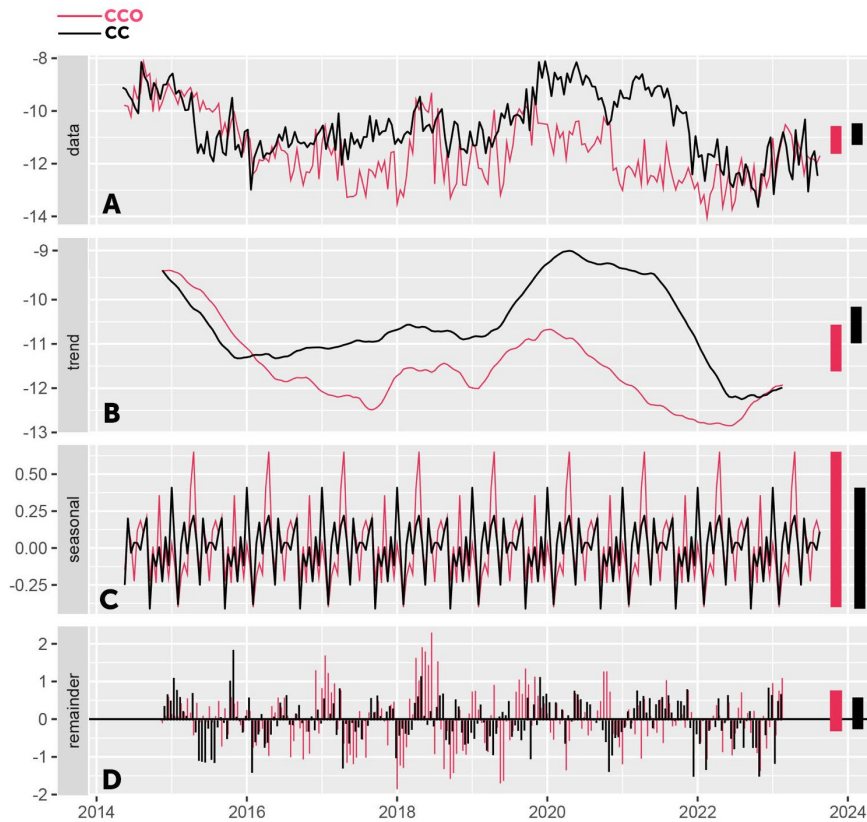
El cálculo del percentil 25 de la serie disponible de escenas de SAR permite la designación de polígonos para el tratamiento de los datos. En el municipio de Caucasia, se asignó un polígono de 1083 ha para el sistema CC, mientras que en el municipio de Nechí se designó uno de 746 ha para el sistema CCO ([Figura 3](#)). En ambos casos es posible fotointerpretar y diferenciar notoriamente el agua de otras coberturas.

Figura 3. Escenas de percentil 25 de datos de SAR en ambos sistemas de humedales.



Notas. Ciénaga Colombia (panel izquierdo) y ciénagas de Corrales y el Ocho (panel derecho). Los polígonos rojos corresponden a los empleados para el procesamiento de la serie de datos.

Figura 4. Descomposición de las series de tiempo de retrodispersión para ciénaga Colombia y ciénagas de Corrales y el Ocho.



Notas. A = datos observados; B = tendencia en el largo plazo; C = componente estacional (delta); D = residuales. Las unidades son decibelios (dB). Barras rojas y negras indican la escala relativa entre los paneles.

Las tendencias generales de las series de tiempo de retrodispersión para los sistemas de humedales presentan comportamientos similares entre sí en el periodo de estudio (Figura 4 A/B). El sistema de humedales CC sugiere una disminución de los valores de retrodispersión del 2014 al 2016. Posteriormente, se presentan valores estables, alrededor de -11 dB, del 2016 al 2019. Los valores de retrodispersión incrementan del 2019 al 2020, alcanzando un máximo -8,10 dB el segundo trimestre de 2020. En adelante, se presenta una disminución abrupta de la retrodispersión de 2021 al 2023, llegando al mínimo de -13,62 dB para el cuarto trimestre de 2022. En el caso del sistema de humedales CCO, las tendencias de retrodispersión indican una disminución abrupta de la serie entre 2014 y 2017, con un máximo de -8,15 dB en el 2015 y una disminución constante hasta alcanzar -12,97 dB en 2017. De 2018 a 2020 los valores de retrodispersión incrementan progresivamente hasta -9,71 dB el primer trimestre de 2020. En adelante, la retrodispersión disminuye progresivamente y alcanza su mínimo de -14,05 dB el segundo trimestre de 2022.

Las series de tiempo de ambos sistemas de humedales presentan una variación estacional a lo largo del tiempo, siendo más fuerte en el sistema de humedales CCO que en el de CC, con una magnitud de cambios de -0,4 a 0,6 dB para el primero y de -0,4 a 0,3 dB para el segundo (Figura 4C). Los ciclos de estacionalidad en el sistema de humedales CCO se presentan cada año, con mínimos de retrodispersión en los meses de enero, junio y octubre y un valor máximo en marzo. En el sistema de humedales de CC se presenta un patrón estacional con mínimos en los meses de febrero, mayo y septiembre y el máximo de estacionalidad en diciembre.

Los residuales o ruido de las series de tiempo de CC y CCO analizadas presentaron una magnitud de -2 y 2 dB (Figura 4D). De acuerdo con los residuales del modelo, la variación estocástica es mayor en CCO, entre 2018 y 2020. Para el caso de CC, los residuales con mayor magnitud se encuentran entre 2014 y 2016, y entre 2021 y 2023.

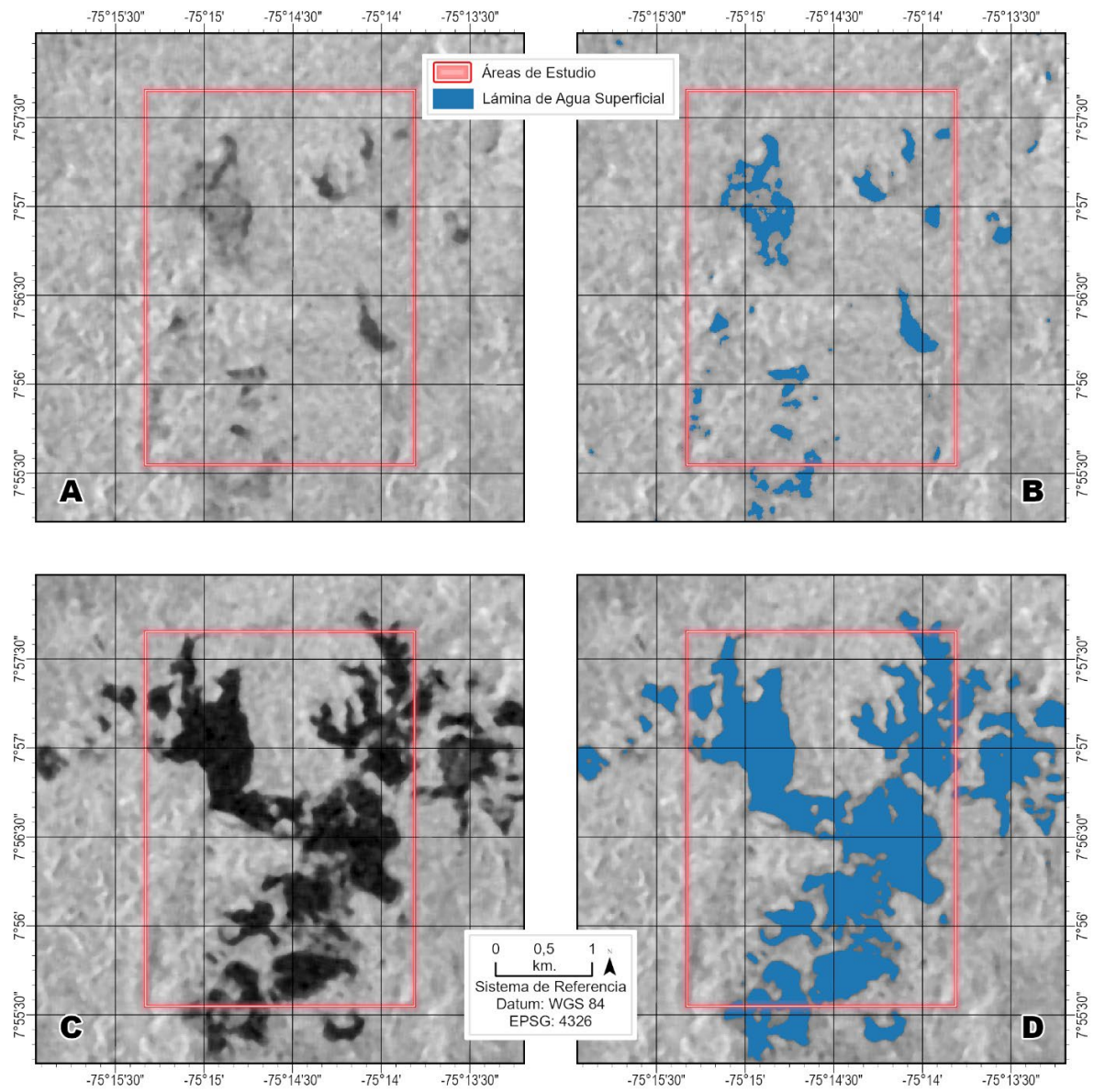
En cuanto a los valores extremos, para CC se observó el mínimo el 14 de noviembre de 2022 y un máximo el 15 de junio de 2020. En el caso de CCO el mínimo se registró para el 24 de abril de 2022 y el máximo el 20 de marzo de 2015. Estos cuatro momentos fueron designados para la generación de histogramas, implementando la propuesta de Otsu et al. (1979), y para cuantificar el área de la lámina de agua superficial en ambos sistemas de humedales (Tabla 2, Figura 5, Figura 6). Para el sistema de humedales CC la segmentación correspondiente al 15 de junio de 2020 resultó inviable; y aunque el cálculo fue posible desde un punto de vista matemático, visualmente el histograma no era bimodal. Por tal razón, dada la cercanía de ambos sistemas de humedales y que la huella del sensor del SAR es la misma para ambos, se empleó para los dos sistemas el valor del umbral generado para el momento de máxima retrodispersión de CCO.

Tabla 2. Fechas y valores para la segmentación de histogramas de retrodispersión. Tamaño de la lámina de agua superficial para ambos sistemas de humedales.

Fecha	CC	CCO	Área (ha)
jun. 14, 2020	-11,64 dB	-	74,04
nov. 14, 2022	-15,54 dB	-	382,21
mar. 20, 2015	-	-11,64 dB	94,16
abr. 24, 2022	-	-15,89 dB	260,17

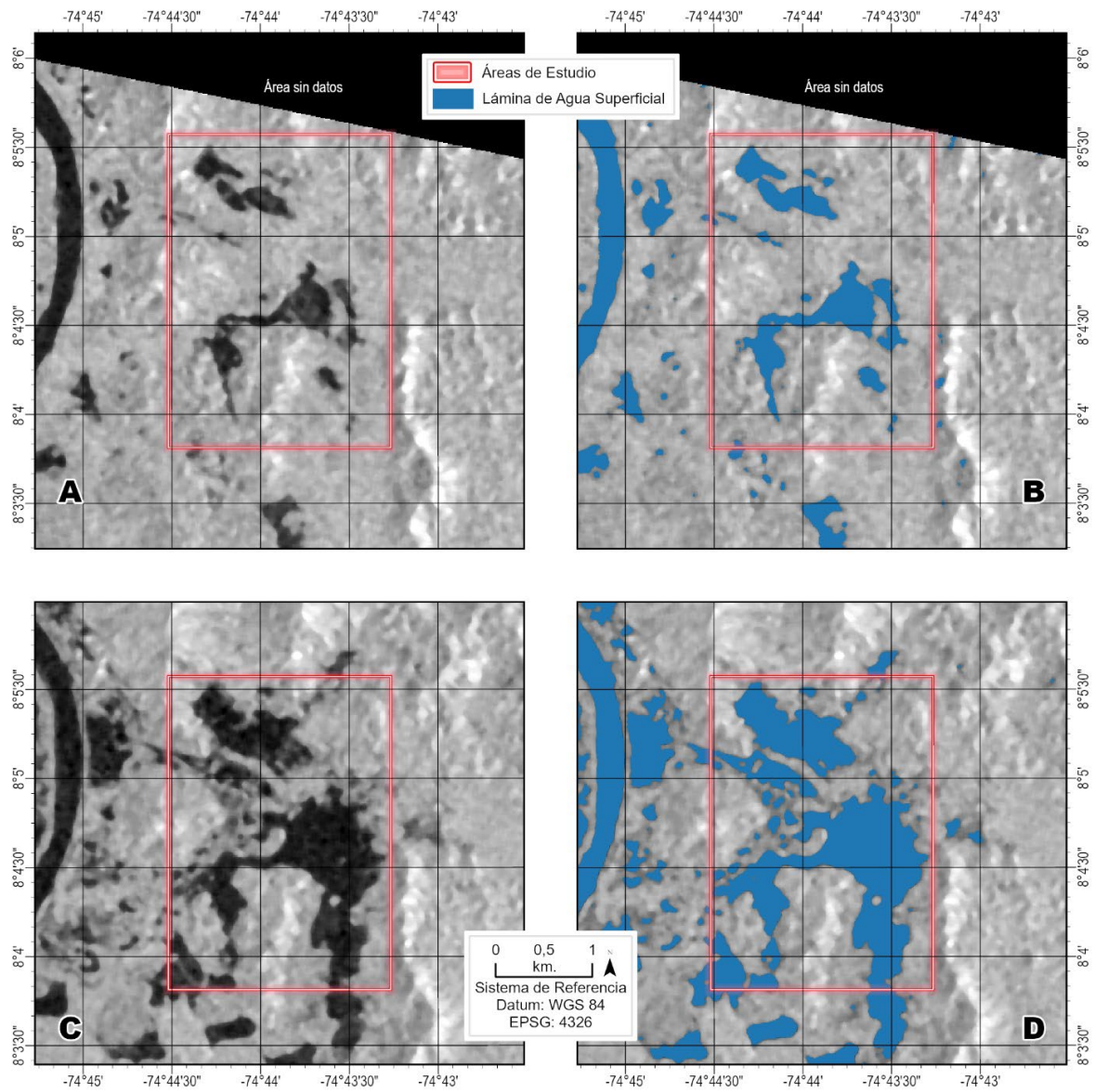
Notas. CC = ciénaga Colombia; CCO = ciénagas Corrales y El Ocho.

Figura 5. Registros de máxima y mínima retrodispersión para el sistema de humedales ciénaga Colombia.



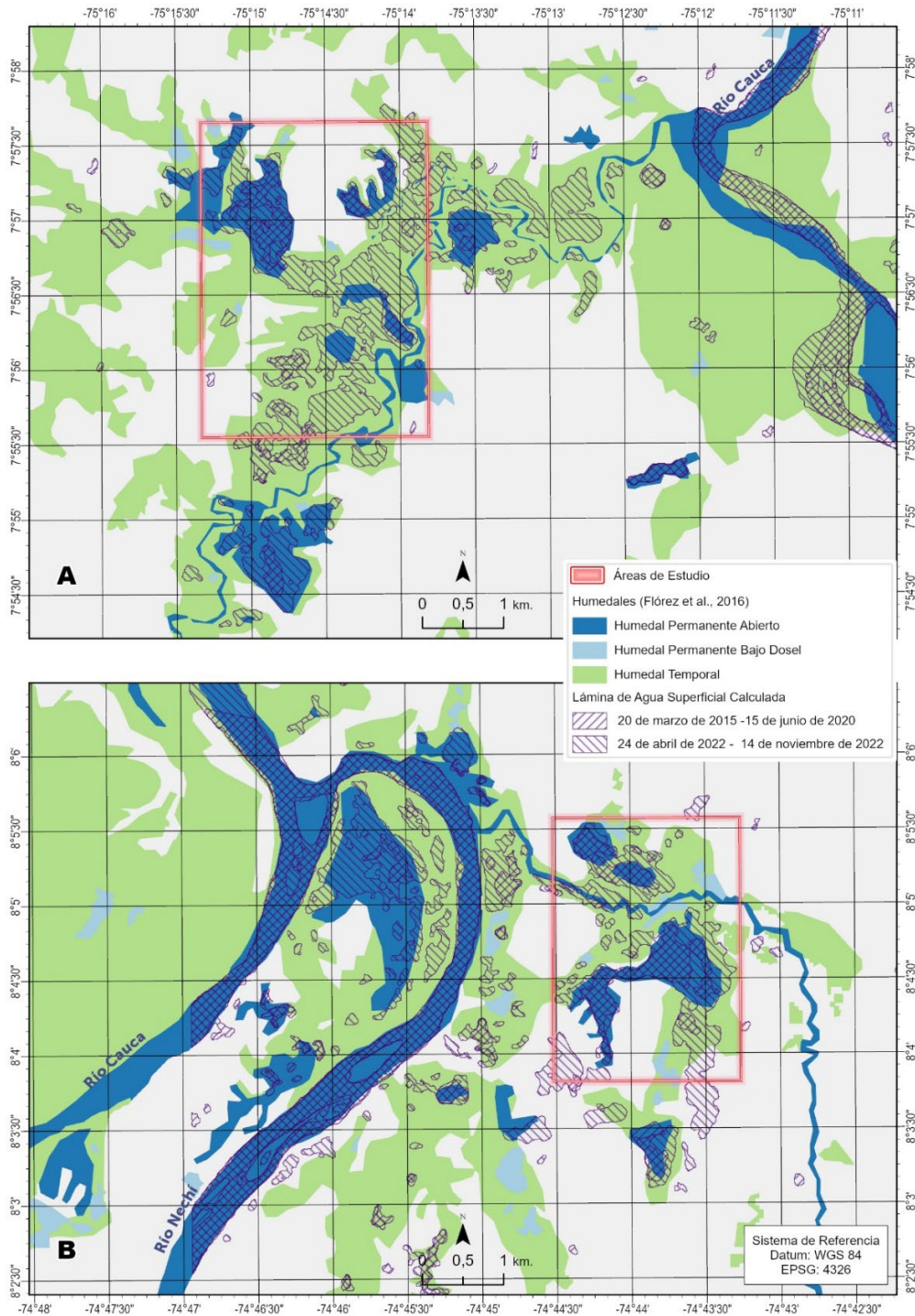
Notas. A = imagen de SAR para el 15 de junio de 2020; B = lámina de agua superficial calculada para el 15 de junio de 2020; C = imagen de SAR para el 14 de noviembre de 2022; D = lámina de agua superficial calculada para el 14 de noviembre de 2022.

Figura 6. Registros de máxima y mínima retrodispersión para el sistema de humedales ciénagas de Corrales y el Ocho.



Notas. A = imagen de SAR para el 20 de marzo de 2015; B = Lámina de agua superficial calculada para el 20 de marzo de 2015; C = imagen de SAR para el 24 de abril de 2022; D = Lámina de agua superficial calculada para el 24 de abril de 2022.

Figura 7. Lámina de agua superficial calculada a partir de datos de SAR Sentinel-1 sobre las categorías propuestas por Flórez et al. (2016).



Validación

El proceso de validación se realizó empleando tres categorías de humedales según lo propuesto por Flórez et al. (2016). En el polígono definido para el sistema de humedales CC se encuentran 161 ha en Humedal Permanente Abierto, 29 ha en Humedal Permanente Bajo Dosel y 274 ha en Humedal Temporal, mientras que en el sistema CCO hay 206 ha en Humedal Permanente Abierto, 8 ha en Humedal Permanente Bajo Dosel y 571 ha en Humedal Temporal. En estas áreas, se superpone la lámina de agua superficial calculada a partir de datos de SAR Sentinel-1 para los momentos de máxima y mínima retrodispersión en ambos sistemas de humedales (Figura 7). En general, los resultados coinciden en ubicación con las categorías definidas para Colombia, excepto por un 10,4% de lámina de agua superficial durante el momento de mínima retrodispersión en CCO (Tabla 3).

Tabla 3. Lámina de agua superficial calculada sobre las categorías propuestas por Flórez et al. (2016).

Lugar	Ha en máx. R	Ha en mín. R	Categoría
	52	138	Permanente
Ciénaga Colombia	19	243	Temporal
	3	1	No aplica
Ciénagas de Corrales y el Ocho	80	129	Permanente
	13	104	Temporal
	1	27	No aplica

Notas. R = retrodispersión.

Discusión

El principio fundamental de este análisis es el bajo valor de retrodispersión que presenta el agua por su interacción especular con la energía emitida por un sensor de SAR (Kasischke et al., 1997). Este planteamiento lo refuerza la propuesta de Bauer et al. (2021), quienes identificaron que los valores promedio de retrodispersión en polarización VV en cuerpos permanentes de agua son los más bajos en comparación con otras cubiertas terrestres. Para el caso, se incluyó el cálculo del percentil 25 de los datos

de SAR para la designación de los polígonos con los que se extraen los datos, de tal forma que fuese factible mantener la suficiente cantidad de píxeles asociados a agua en las series temporales y, en definitiva, segmentar los datos coherentemente empleando los histogramas. Lo anterior permitió identificar que valores inferiores a -11,64 db en la polarización VV del sensor Sentinel-1 pueden asociarse a lámina de agua superficial en momentos de estiaje en ambos sistemas de humedales.

Las tendencias de retrodispersión en el largo plazo de ambos complejos de humedales fueron similares (Figura 4 A/B). Del 2015 al 2017, los valores de retrodispersión disminuyeron sustancialmente en ambos registros. Dicha tendencia se relaciona con un aumento en el tamaño de la lámina de agua, la cual se puede explicar por el debilitamiento de la sequía generada por El Niño del 2014 y el aumento de las condiciones húmedas generadas por el fenómeno de La Niña de 2017 (OMM, 2022). Posteriormente, de 2018 a 2020, los valores de retrodispersión incrementaron progresivamente, indicando una disminución de la lámina de agua en ambos sistemas de humedales. Durante este periodo se presentan condiciones débiles a moderadas del fenómeno de El Niño asociadas a condiciones secas en la región (OMM, 2022). El periodo entre 2020 y 2022 se caracterizó por un incremento de la lámina de agua en ambos sistemas, aunque más abrupto en CCO. Para este periodo en mención, hubo condiciones moderadas a fuertes del fenómeno de La Niña (OMM, 2022). Los datos obtenidos para el primer trimestre del 2023 sugieren una disminución progresiva de la lámina de agua en ambos sistemas de humedales.

Las tendencias y cambios de retrodispersión en el tiempo también exhibieron un acoplamiento con la variabilidad interanual (ENSO), siendo más fuerte en el sistema de humedales CCO. La lámina de agua superficial en los humedales fue mayor durante la estación lluviosa (abril a noviembre) desde el 2014 al 2023, en medio de eventos de La Niña en 2016, 2017, 2020, 2021 y 2022. Por otro lado, los ciclos de disminución del tamaño de agua correspondieron a las estaciones más secas en marzo de 2015 y junio de

2020, en medio de El Niño de 2014-2015 y 2018-2020. Al presentarse una correspondencia más fuerte de la variación estacional de CCO con procesos de variabilidad climática, el sistema evidenció un menor déficit hídrico del 2014 al 2023, en comparación con el sistema CC. Por lo tanto, es probable que un sistema en óptimo estado de conservación como el CCO comparado con uno antropizado (p. ej., CC) presente un mayor control del estrés hídrico (Poveda et al., 2020). Esto se evidencia a partir de los máximos de retrodispersión para la serie de tiempo del sistema CC (Figura 4 A/B).

El análisis de estacionalidad de la retrodispersión (Figura 4C) presenta escenarios contrastantes en ambos humedales. Esta variable indica cuándo experimentan los datos cambios regulares y predecibles cada año. Para CC se presentaron valores máximos de retrodispersión a lo largo del año, durante meses secos y lluviosos. Esto sugiere que la dinámica del sistema CC no corresponde con los patrones de estacionalidad asociados al clima y puede reflejar más bien procesos controlados por la acción humana, como aquel correspondiente al llenado del embalse de Hidroituango en 2018 (ANLA, 2019; EPM, 2022). Es posible que las acciones humanas modifiquen el patrón estacional de los cuerpos de agua y, por tanto, que la dinámica de un humedal no se asocie a procesos naturales. Si bien la retrodispersión de CC presenta un patrón estacional, los efectos potenciales de las hidroeléctricas en los flujos de agua hacen que los tiempos y magnitudes de respuesta del espejo de agua durante el año sean inciertos. Esto implica que los valores máximos y mínimos de retrodispersión aumenten durante los últimos años en la ciénaga y no estén claramente representadas por el componente estacional de una serie temporal. Así también se podría explicar el aumento de los residuales hacia el presente (Figura 4D), lo cual sugiere una alta incertidumbre, que no es explicada por la estacionalidad y la tendencia de los datos.

El sistema de humedales CCO presentó mínimos de retrodispersión que se repitieron durante los meses de enero, junio y octubre de cada año (Figura 4C); los

últimos dos meses coincidieron con el periodo de lluvias en la región, que, según la información climatológica, va de abril a noviembre (Ideam, 2005). Además, se encontró una correspondencia del valor máximo de retrodispersión en el mes de marzo con aquellos meses donde la precipitación es menor (febrero-marzo). Cabe resaltar que la lámina de agua superficial alcanza la menor extensión de todo el registro el 20 de marzo del 2015 (Figura 6B). Durante periodos de sequía se puede notar un patrón estacionario de mínimos de retrodispersión durante el mes de enero, cuya posible explicación es que, para la temporalidad de análisis (2015-2023), dicho mes presentó condiciones húmedas prolongadas que fueron provocadas en gran medida por el retorno de la variabilidad climática ocasionada por el ENOS (Poveda & Mesa, 1996; Poveda et al., 2020). Por lo tanto, se ratifica el efecto de la variabilidad climática sobre los cambios en el tamaño de la lámina de agua superficial, así como su dependencia de los patrones de precipitación a lo largo del año en esa región de Colombia (Poveda & Mesa, 1996). Asimismo, la dependencia climática de los humedales podría explicar la disminución de los residuales o varianza no explicada por el clima hacia el presente (Figura 4D).

La propuesta de Otsu (1979) para la segmentación de histogramas, en este caso de datos de SAR, con el objetivo de calcular la lámina de agua superficial en humedales, ha sido respaldada por diversos investigadores (Du et al., 2016; Xing et al., 2018; Hu et al., 2020; Tiwari et al., 2020; Zhang et al., 2020; Sekertekin, 2021; Velásquez & Pérez, 2024). Sin embargo, fue necesario para la época de estiaje de CC emplear los valores de segmentación de CCO, ya que visualmente el histograma carecía de una segmentación perceptible.

Es claro que la banda L de sensores de SAR tiene gran capacidad de penetrar el dosel para estudiar con detalle el agua en superficie en sistemas de humedales, siendo esta la base de los estudios realizados por Estupiñán et al. (2015), Flórez et al. (2016) y Quiñones et al. (2016), que fueron empleados para validar la coherencia de los resultados de esta investigación. Aunque existe

suficiente traslape entre ambos cálculos, seguramente debido a que hubo subestimación de áreas producto de la menor capacidad de penetración que tiene la banda C de la misión Sentinel-1 y que son la fuente de datos de este documento.

Conclusión

Los humedales y el agua desempeñan un papel crucial en la supervivencia de la humanidad. Por ello, tratados internacionales como el Convenio de Ramsar y los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos de la ONU (2022) reconocen la imperativa necesidad de proteger y gestionar de manera más efectiva estos recursos. Lo anterior incluye acciones específicas como la cartografía y el monitoreo detallado. En esa dirección, este estudio presenta una metodología reproducible que permite analizar y describir los cambios en la extensión de la lámina superficial del agua en humedales abiertos, perennes y con diferentes estados de conservación, y que se puede replicar en otras regiones de Colombia.

La información proveniente de sensores de SAR, para el caso de banda C, permite generar resultados coherentes y útiles para la gestión de los humedales, así como evaluar de forma rápida la evolución temporal o posibles impactos antrópicos sobre estos ecosistemas. Con este planteamiento, fue posible identificar los momentos de mayor y menor tamaño de lámina de agua superficial en ambos sistemas de humedales, así como acercarse a comprender sus dinámicas estacionales.

La descomposición de la serie temporal de retrodispersión de los dos sistemas de humedales estudiados proporciona información valiosa para comprender las tendencias, los patrones estacionales y la variabilidad a lo largo del tiempo. Los procesos asociados a los cambios en el espejo de agua del complejo de ciénagas de Corrales y El Ocho (CCO) son estacionales y, como consecuencia, sus tiempos y magnitudes son consistentes entre años. Esto implica que las variaciones anuales en el tamaño del espejo de agua en CCO están siguiendo un patrón estacional claramente relacionado con condiciones naturales y

la distribución anual de la precipitación en la región. En cambio, para la ciénaga Colombia (CC), la variación estacional del sistema de humedales no presentó una correspondencia a lo largo del tiempo con el clima (precipitación), lo cual es evidencia de algunos desacoplamientos.

Es probable que los efectos conjugados del clima y las actividades humanas en la región hayan llevado a una disminución sustancial del tamaño de estos sistemas de humedales y, por ello, a una menor disponibilidad del recurso hídrico. Los cambios en el tamaño de los humedales están vinculados a la variabilidad climática ocasionada por la Oscilación del Sur (ENOS). Además, los efectos potenciales de las hidroeléctricas pueden modificar los tiempos y magnitudes de respuesta de la lámina superficial del agua durante el año, lo que hace incierta su respuesta ante fenómenos climáticos a escala global.

Debe mencionarse que utilizar únicamente los valores extremos de retrodispersión para los cálculos propuestos puede inducir errores, debido a la posible influencia sobre la retrodispersión de factores como el viento sobre el agua y las variaciones en las cubiertas terrestres. Para aumentar el acierto en los cálculos, se sugiere una metodología que incluya el cálculo de la lámina de agua para cada escena de Sentinel-1 disponible en la serie temporal y realizar los análisis cualitativos, cuantitativos y estadísticos pertinentes.

Referencias

- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2019). PIS - Proyecto Hidroeléctrico Pescadero Ituango. <https://www.anla.gov.co/proyectos-de-interes-en-seguimiento/pis-proyecto-hidroelectrico-pescadero-ituango>
- Barbier, E. B. (2011). Wetlands as natural assets. *Hydrological Sciences Journal*, 56(8), 1360-1373. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.629787>
- Bauer-Marschallinger, B., Cao, S., Navacchi, C., Freeman, V., Reuß, F., Geudtner, Rommen, B., Ceba Vega, F., Snoeji, P., Attema, E., Reimer, C., & Wagner, W. (2021). The normalised Sentinel-1

- global backscatter model, mapping Earth's land surface with C-band microwaves. *Scientific Data*, 8(1), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01059-7>
- Betancur-Vargas, T., García-Giraldo, D. A., Vélez-Duque, A. J., Gómez, A. M., Flórez-Ayala, C., Patiño, J., & Ortiz-Tamayo, J. Á. (2017). Groundwater, wetlands and ecosystem services in Colombia. *Biota Colombiana*, 18(1), 1-28. <https://doi.org/10.21068/c2017.v18n01a1>
- Betancur, T., Mejía, O., & Palacio, C. (2009). Modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño: un sistema acuífero tropical. *Revista Facultad de Ingeniería*, 48, 107-118.
- Bhatt, C. M., Gupta, A., Roy, A., Dalal, P., & Chauhan, P. (2019). Geospatial analysis of September, 2019 floods in the lower gangetic plains of Bihar using multi-temporal satellites and river gauge data. *Gomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 84-102. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1861113>
- Clement, M. A., Kilsby, C. G., & Moore, P. (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>
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (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). <https://doi.org/10.3390/rs8040354>
- Empresas Públicas de Medellín. (2022). Hidroituango. Proyecto Hidroeléctrico Ituango. <https://www.hidroituango.com.co/caracteristica-s-del-proyecto/>
- Estupiñán-Suárez, L. M., Flórez-Ayala, C., Quiñones, M. J., Pacheco, A. M., & Santos, A. C. (2015). Detection and characterization of Colombian wetlands: Integrating geospatial data with remote sensing derived data. Using Alos Palsar and Modis imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Archives*, 40(7W3), 375-382. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-375-2015>
- European Space Agency (2023). Sentinel-1 Missions. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., & Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Flórez, C., Estupiñán-Suárez, L. M., Rojas, S., Aponte, C., Quiñones, M., Acevedo, Ó., Vilardy, S., & Jaramillo, Ú. (2016). Identificación espacial de los sistemas de humedales continentales de Colombia. *Biota Colombiana*, 17(1), 44-62. <https://doi.org/10.21068/C2016s01a03>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.06.031>
- Gulácsi, A., & Kovács, F. (2020). Sentinel-1-imagery-based high-resolution water cover detection on wetlands, aided by Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/rs12101614>
- Hanjsek, I., & Desnos, Y.-L. (2021). Polarimetric Synthetic Aperture Radar. Principles and application. *Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56504-6>
- Henderson, F. M., & Lewis, A. J. (2008). Radar detection of wetland ecosystems: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 29(20), 5809-5835. <https://doi.org/10.1080/01431160801958405>

- Hu, S., Qin, J., Ren, J., Zhao, H., Ren, J., & Hong, H. (2020). Automatic extraction of water inundation areas using Sentinel-1 data for large plain areas. *Remote Sensing*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/rs12020243>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2005). Atlas climatológico de Colombia. <http://www.ideam.gov.co/AtlasWeb/index.html>
- Kasischke, E. S., & Bourgeau-Chávez, L. L. (1997). Monitoring south Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(3), 281-291.
- Kasischke, E. S., Melack, J. M., & Dobson, M. C. (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)
- Kendall, M. G., Stuart, A., & Ord, J. K. (1983). *Kendall's advanced theory of statistics* (vol. 3). Oxford University Press.
- Manjusree, P., Prasanna Kumar, L., Bhatt, C. M., Rao, G. S., & Bhanumurthy, V. (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(2), 113-122. <https://doi.org/10.1007/s13753-012-0011-5>
- Markert, K. N., Markert, A. M., Mayer, T., Nauman, C., Haag, A., Poortinga, A., Bhandari, B., Soe Thwal, N. S., Kunlami, T., Chishtie, F., Kwant, M., Phongsapan, K., Clinton, N., Towashiraporn, P., & Saah, D. (2020). Comparing Sentinel-1 surface water mapping algorithms and radiometric terrain correction processing in southeast Asia utilizing Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(15), 1-20. <https://doi.org/10.3390/RS12152469>
- Mestas-Núñez, A. M., Enfield, D. B., & Zhang, C. (2007). Water vapor fluxes over the Intra-Americas Sea: Seasonal and interannual variability and associations with rainfall. *Journal of Climate*, 20(9), 1910-1922. <https://doi.org/10.1175/JCLI4096.1>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2001). *National wetland policies: Colombia. Política nacional para humedales interiores de Colombia. Estrategias para su conservación y uso racional*. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/national_wetland_policies_-_colombia.pdf
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
- Organización Meteorológica Mundial. (2022). El Niño/La Niña hoy. Organización Meteorológica Mundial.
- Organización de las Naciones Unidas (2022). Objetivos de desarrollo sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Otsu, N., Smith, P. L., Reid, D. B., Environment, C., Palo, L., Alto, P., & Smith, P. L. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC, (1), 62-66.
- Passaro, M., Müller, F. L., & Dettmering, D. (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>
- Planet. (2023). Norway's International Climate and Forests Initiative Satellite Data Program. <https://www.planet.com/nicfi/>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2023). Runap. Ciénagas Corrales y El Ocho. <https://runap.parquesnacionales.gov.co/area-prottegida/1544>
- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., & Van Oevelen, P. J. (2020). High impact weather events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8, 1-32. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162>
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su

- influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México*, 11(1), 21-37.
- Quiñones, M., Vissers, M., Pacheco-Pascaza, A. M., Flórez, C., Estupiñán-Suárez, L. M., Aponte, C., Jaramillo, Ú., Huertas, C., & Hoekman, D. (2016). Un enfoque ecosistémico para el análisis de una serie densa de tiempo de imágenes de radar Alos Palsar, para el mapeo de zonas inundadas en el territorio continental colombiano. *Biota Colombiana*, 7(2), 304. <https://doi.org/10.21068/C2016s01a04>
- R Core Team. (2021). The R Project for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Ramsar Convention Secretariat. (1971). Convention on wetlands of international importance especially as waterfowl habitat. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/scan_certified_e.pdf
- Sekertekin, A. (2021). A survey on global thresholding methods for mapping open water body using Sentinel-2 satellite imagery and normalized difference water index. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 1335-1347. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09416-2>
- Tian, H., Li, W., Wu, M., Huang, N., Li, G., Li, X., & Niu, Z. (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), 6-9. <https://doi.org/10.3390/rs9060521>
- Tian, H., Wang, J., Pei, J., Qin, Y., Zhang, L., & Wang, Y. (2020). High spatiotemporal resolution mapping of surface water in the southwest Poyang lake and its responses to climate oscillations. *Sensors*, 20(17), 1-17. <https://doi.org/10.3390/s20174872>
- Tiwari, V., Kumar, V., Matin, M. A., Thapa, A., Ellenburg, W. L., Gupta, N., & Thapa, S. (2020). Flood inundation mapping-Kerala 2018; harnessing the power of SAR, automatic threshold detection method and Google Earth Engine. *PLoS ONE*, 15(8), 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237324>
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B. Ö., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Velásquez-Franco, P. A., & Pérez-González, M. E. (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). <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.105225>
- White, L., Brisco, B., Daboor, M., Schmitt, A., & Pratt, A. (2015). A collection of SAR methodologies for monitoring wetlands. *Remote Sensing*, 7(6), 7615-7645. <https://doi.org/10.3390/rs70607615>
- Xing, L., Tang, X., Wang, H., Fan, W., & Wang, G. (2018). Monitoring monthly surface water dynamics of Dongting lake using Sentinel-1 data at 10 m. *PeerJ*, 2018(6), 1-22. <https://doi.org/10.7717/peerj.4992>
- Yan, K., Di Baldassarre, G., Solomatine, D. P., & Schumann, G. J. P. (2015). A review of low-cost space-borne data for flood modelling: topography, flood extent and water level. *Hydrological Processes*, 29(15), 3368-3387. <https://doi.org/10.1002/hyp.10449>
- Zapata, G., Bermúdez, J. G., Rodríguez, G., & Arango, M. I. (2013). Cartografía geológica de la plancha 83 Nechí (Departamento de Antioquia). Servicio Geológico Colombiano, 94. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B14/23008010024595/Documento/Pdf/2105245951101000.pdf>
- Zedler, J. B., & Kercher, S. (2005). Wetland resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 39-74. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>

Zhang, M., Chen, F., Tian, B., Liang, D., & Yang, A. (2020). High-frequency glacial lake mapping using time series of Sentinel-1A/1B Sar imagery: an assessment for the southeastern Tibetan plateau.

International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(3).
<https://doi.org/10.3390/ijerph17031072>