

Invasión de *Hydrilla* amenaza el humedal costero más grande de Colombia

Hydrilla invasion threatening Colombia's largest coastal wetland

Horst Salzwedel¹

0000-0002-8657-2290

Horst.salzwedel@gmail.com

Juan Carlos Mejía-Rentería²

0000-0002-7388-2820

Juancamejia84@gmail.com

José Ernesto Mancera Pineda³

0000-0003-2948-3387

jemancerap@unal.edu.co

1. Investigador Independiente, Calle 18 # 22-52, Santa Marta, Colombia
2. Ecomanglares; Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (INCIMAR); Departamento de Biología, Universidad del Valle, Cali, Colombia; Smithsonian Tropical Research Institute; Apartado Postal 0843-0392, Balboa, Ancón, Panamá
3. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia

Recibido / Received: 09/02/2026

Aceptado / Accepted: 18/05/2026

Citación / Citation: Salzwedel, H.; Mejía-Rentería, J.C.; Mancera-Pineda, J.E. 2026. Invasión de *Hydrilla* amenaza el humedal costero más grande de Colombia. Bol. Invest. Mar. Cost., 55(2): 189-199.

RESUMEN

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), el humedal costero más extenso de Colombia, ha sido monitoreada durante más de 25 años debido a su alta importancia ecológica y socioeconómica. Desde 2020 se ha observado un proceso de dulcificación que probablemente favoreció la reciente invasión de la macrófita acuática *Hydrilla verticillata* en el Complejo Pajarales, único subsistema donde esta invasión ha sido documentada hasta ahora. Este estudio presenta una evaluación rápida y cuantitativa de la expansión espacial y temporal de la vegetación acuática mediante imágenes Sentinel-2 y Google Earth Engine. Se generaron composiciones mensuales del NDVI para el período julio de 2024–enero de 2026, clasificando las superficies de agua con NDVI $\geq 0,40$ como cubiertas por vegetación.

La cobertura vegetal aumentó de menos de 2 km² en julio de 2024 a más de 48 km² en enero de 2026 dentro de un área de estudio de aproximadamente 60,7 km². Verificaciones en campo entre septiembre de 2025 y enero de 2026 confirmaron que la vegetación detectada corresponde principalmente a coberturas densas de *H. verticillata* y *Eichhornia crassipes*. El flujo de trabajo aplicado ofrece un enfoque reproducible para monitorear vegetación acuática invasora en humedales costeros tropicales.

Palabras clave: Caribe, Ciénaga Grande de Santa Marta, *Hydrilla verticillata*, macrófitas invasoras, teledetección.

ABSTRACT

The Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), Colombia's largest coastal wetland, has been monitored for more than 25 years due to its high ecological and socioeconomic importance. Since 2020, a freshening process has been observed that likely facilitated the recent invasion of the aquatic macrophyte *Hydrilla verticillata* in the Pajarales Complex, the only subsystem where this invasion has been documented so far.

This study presents a rapid and quantitative assessment of the spatial and temporal expansion of aquatic vegetation using Sentinel-2 imagery and Google Earth Engine. Monthly NDVI composites were generated for the period July 2024–January 2026, classifying water surfaces with NDVI ≥ 0.40 as vegetation-covered.

Vegetation cover increased from less than 2 km² in July 2024 to more than 48 km² in January 2026 within a study area of approximately 60.7 km². Field verification conducted between September 2025 and January 2026 confirmed that the detected vegetation mainly corresponded to dense stands of *H. verticillata* and *Eichhornia crassipes*. The applied workflow provides a reproducible approach for monitoring invasive aquatic vegetation in tropical coastal wetlands.

Keywords: Caribbean, Ciénaga Grande de Santa Marta, *Hydrilla verticillata*, invasive macrophytes, remote sensing.

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es el humedal costero más grande y uno de los más importantes de Colombia. Ha sido monitoreada de manera continua por Invemar, en nombre de la autoridad ambiental Corpamag, durante más de 25 años, especialmente desde que diversas intervenciones de infraestructura alteraron el delicado equilibrio hidrológico de este sistema acuático somero. Mientras que en el pasado la salinización de los suelos provocó una amplia mortalidad de manglares —y, en consecuencia, el colapso de las pesquerías locales—, la situación actual parece estar asociada a un proceso de dulcificación de grandes sectores del complejo lagunar desde 2020 (Invemar, 2024). Esta dulcificación probablemente ha favorecido la reciente y extensa invasión de *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle, particularmente en las cercanías del poblado palafítico de Nueva Venecia, dentro del Complejo Pajarales.

Hydrilla verticillata es una planta acuática vascular invasora que se ha propagado rápidamente en numerosos cuerpos de agua dulce a nivel mundial, desplazando la vegetación nativa. Ha sido denominada “la maleza acuática perfecta” debido a su crecimiento agresivo y a características morfológicas que le permiten adaptarse a diversas condiciones ambientales (Langeland, 1996; Shrivastava y Shrivastava, 2021). Es una especie perenne con un sistema radicular extenso y una alta tasa de crecimiento, ya que, además de la fragmentación vegetativa, se reproduce por tubérculos, brotes y semillas, formando un dosel superficial que bloquea la penetración de la luz en la columna de agua. Asimismo, *H. verticillata* puede albergar cianobacterias tóxicas asociadas a enfermedades neurodegenerativas que afectan aves acuáticas, rapaces y anfibios (Hofstra et al., 1999).

Desde agosto de 2025, los medios de comunicación colombianos han informado de manera recurrente sobre lo que describen como la “crisis de la CGSM”, y la autoridad local responsable de Nueva Venecia ha declarado un estado de emergencia pública. Una visita de campo realizada el 24 de septiembre de 2025 (Salzwedel, 2025), así como registros posteriores (Mongabay, 2026), confirmaron la proliferación masiva de *H. verticillata* enraizada en el fondo, con *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms adherida a esta —una especie que anteriormente flotaba libremente y, por tanto, era más fácil de controlar. Dado que la detección temprana de *Hydrilla* es fundamental para reducir los costos de control (Kumar et al., 2019), este estudio se diseñó como una evaluación rápida para estimar cuantitativamente la extensión espacial de la invasión y

The Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) is Colombia's largest and most important coastal wetland. It has been continuously monitored by Invemar on behalf of the environmental authority Corpamag for more than 25 years, particularly since various infrastructural interventions disrupted the delicate hydrological balance of this shallow aquatic system. Whereas in the past it was soil salinization that caused widespread mangrove dieback—and consequently the collapse of local fisheries—the current situation appears to be driven by a freshening of large parts of the lagoon complex since 2020 (Invemar, 2024).

This freshening has likely triggered the recent and extensive invasion of *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle, especially in the vicinity of the stilt village of Nueva Venecia within the Pajarales Complex.

Hydrilla verticillata is an invasive vascular aquatic plant that has spread rapidly in many freshwater bodies worldwide, displacing native vegetation. It is called “the perfect aquatic weed” due to its aggressive growth and morphological characteristics that adapt to different environmental conditions (Langeland 1996; Shrivastava and Shrivastava, 2021). It is a perennial species with an extensive root system that grows very quickly because, in addition to vegetative fragmentation, it reproduces by tubers, shoots, and seeds, forming a surface canopy that blocks light penetration through the water column. *Hydrilla verticillata* can serve as a host for a toxic cyanobacterium that causes a neurodegenerative disease affecting waterfowl, raptors, and amphibians (Hofstra et al., 1999).

Since August 2025, Colombian news media have frequently reported on what they describe as the “crisis of the CGSM,” and the mayor responsible for Nueva Venecia has already declared a state of public emergency. An on-site visit on 24 September 2025 (Salzwedel, 2025) and further on-site reports (Mongabay, 2026) confirmed the extensive proliferation of the bottom-rooted *H. verticillata* and the attachment of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms to it — a species that had previously been observed floating freely and was therefore much easier to control. Early detection of *Hydrilla* infestation is crucial for reducing control costs (Kumar et al., 2019). Therefore, this rapid assessment was conducted to quantitatively estimate the spatial extent of the invasive species and to develop a rapid tool for monitoring and predicting the extent of *H. verticillata* in the CGSM.

The analysis focused on a predefined polygon representing

desarrollar una herramienta ágil de monitoreo y proyección de su expansión en la CGSM.

El análisis se centró en un polígono predefinido que representa el Complejo Pajarales dentro de la CGSM, con una superficie aproximada de 60.7 km². El área de interés (AOI) se definió en Google Earth Engine (GEE) utilizando imágenes Sentinel-2 Nivel-2A correspondientes al período enero–marzo de 2022. Las imágenes con menos de 30 % de nubosidad se compusieron mediante un reductor de la mediana. Los cuerpos de agua se extrajeron usando el Índice Normalizado de Diferencia de Agua (NDWI; McFeeters, 1996), con un umbral automático determinado por el método de Otsu (Otsu, 1979). El mayor polígono contiguo de agua a 10 m de resolución se seleccionó como AOI para los análisis posteriores.

El polígono del AOI se importó a un script independiente en GEE como geometría vectorial y se empleó para filtrar espacialmente las imágenes Sentinel-2, enmascarar los píxeles fuera del AOI y calcular métricas basadas en área. El polígono representa un sistema acuático semi-encerrado, caracterizado por una cobertura vegetal estacionalmente variable y niveles de agua fluctuantes (Figura 1). El poblado palafítico de Nueva Venecia, ubicado dentro del AOI, comprende aproximadamente 720 viviendas, según conteos de techos realizados con imágenes satelitales de alta resolución adquiridas entre 2022 y 2023 (CNES/Airbus; Google Earth, 2026).

Se utilizaron imágenes de reflectancia superficial Sentinel-2 MSI Nivel-2A, disponibles a través de la colección COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED en GEE. El análisis cubrió 19 meses (julio de 2024–enero de 2026), empleando las bandas B8 (infrarrojo cercano, 842 nm) y B4 (rojo, 665 nm). Se retuvieron imágenes con un porcentaje de píxeles nublados ≤ 80 %. Las nubes y cirros se enmascararon usando la máscara QA60 (bits 10 y 11), y se excluyeron píxeles con reflectancia inválida o igual a cero. Para verificar la robustez del procedimiento de enmascaramiento de nubes, se realizó una prueba adicional utilizando el producto de probabilidad de nubes de Sentinel-2 (COPERNICUS/S2_CLOUD_PROBABILITY; umbral 20%), obteniéndose estimaciones del área cubierta por vegetación prácticamente idénticas. Las escenas duplicadas se eliminaron mediante el filtrado por PRODUCT_ID. El análisis estadístico se realizó a 30 m de resolución y la visualización a 10 m.

the Pajarales Complex within the CGSM, with an approximate surface area of 60.7 km². The area of interest (AOI) was defined in Google Earth Engine (GEE) using Sentinel-2 Level-2A imagery from January–March 2022. Images with $<30\%$ cloud cover were composed using a median reducer. Water bodies were extracted using the Normalized Difference Water Index (NDWI; McFeeters, 1996), with an automatic threshold determined by Otsu's method (Otsu, 1979). The largest contiguous water polygon at 10 m resolution was selected as the AOI for subsequent analyses.

The AOI polygon was imported into a separate script in GEE, as a vector geometry and applied to spatially filter Sentinel-2 imagery, mask pixels outside the AOI, and compute area-based metrics. The polygon represents a semi-enclosed aquatic system characterized by seasonally variable vegetation cover and fluctuating water levels (Figure 1). The stilt village of Nueva Venecia, located within the AOI, comprises some 720 dwellings, based on roof counts from high-resolution satellite imagery acquired in 2022–2023 (CNES/Airbus; Google Earth, 2026).

Sentinel-2 MSI Level-2A surface reflectance imagery was accessed via the COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED collection in GEE. Analysis covered 19 months (July 2024–January 2026) using bands B8 (NIR, 842 nm) and B4 (Red, 665 nm). Images with CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE ≤ 80 were retained. Clouds and cirrus were masked using the QA60 bitmask (bits 10 and 11), and pixels with invalid or zero reflectance were excluded. To verify the robustness of the cloud masking procedure, an additional processing test using the Sentinel-2 cloud probability dataset (COPERNICUS/S2_CLOUD_PROBABILITY; threshold 20%) was conducted, producing nearly identical vegetation-area estimates. Duplicate scenes were removed using PRODUCT_ID filtering. Imagery was analyzed at 30 m resolution for statistics and 10 m for visualization.

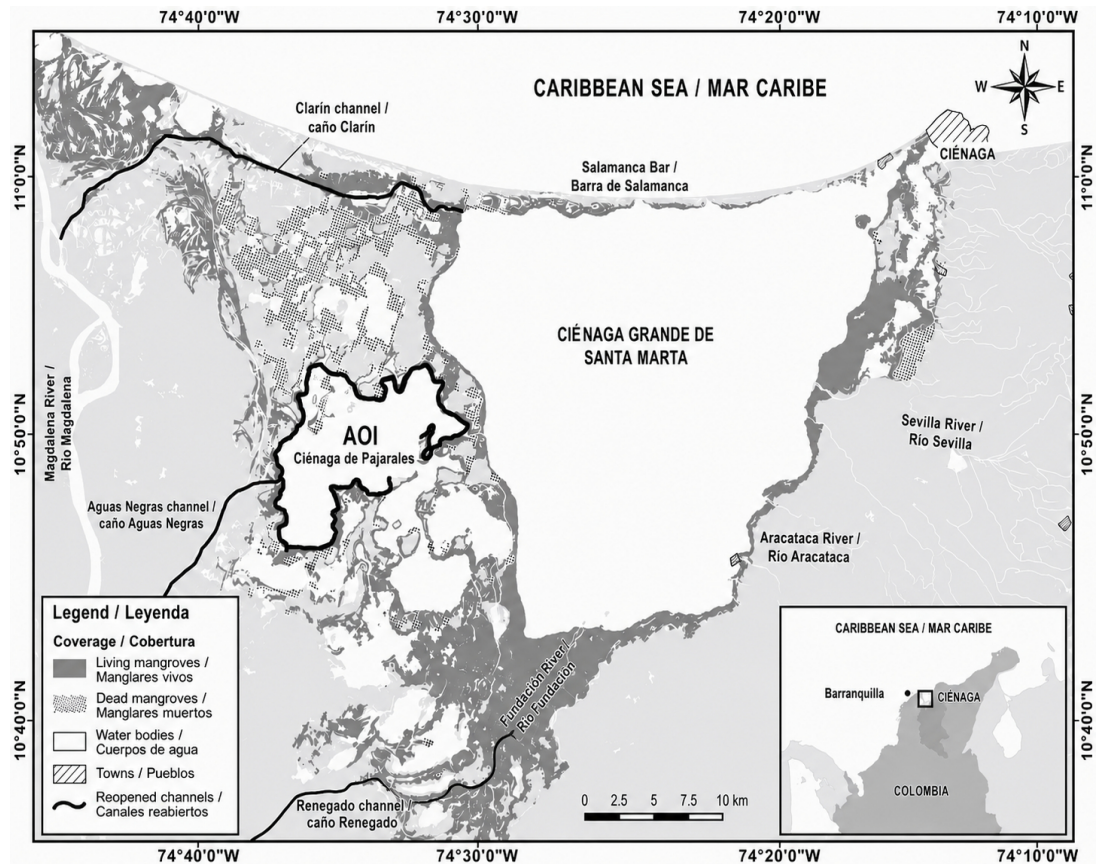


Figura 1. Ubicación del Área de Interés (AOI) dentro del Complejo Pajarales, un subsistema del humedal costero Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), Colombia. Mapa tomado de Mancera *et al.* (2025).

Figure 1. Location of the Area of Interest (AOI) within the Pajarales Complex, a sub-system of the Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) coastal wetland, Colombia. Map taken from Mancera *et al.* (2025).

La vegetación acuática se detectó mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), un indicador ampliamente utilizado para identificar vegetación fotosintéticamente activa a partir de la reflectancia en las bandas roja y del infrarrojo cercano. El NDVI se calculó para cada imagen como $(B8 - B4)/(B8 + B4)$. A partir de todas las escenas válidas de cada mes (entre 6 y 16; promedio ≈ 11) se generaron composiciones mensuales de la mediana del NDVI. Los píxeles con $NDVI \geq 0,40$ se clasificaron como superficies acuáticas cubiertas por vegetación, representando principalmente macrófitas como *H. verticillata* y *E. crassipes*; los valores inferiores se consideraron agua abierta o superficies sin vegetación. Este umbral se seleccionó para separar de forma conservadora las coberturas densas de macrófitas del agua abierta o turbia, que en ambientes lagunares someros suele presentar valores de NDVI sustancialmente menores, y es consistente con enfoques basados en NDVI comúnmente utilizados para la detección de vegetación acuática en imágenes multispectrales (Cho *et al.*, 2008; Song y Park, 2020).

Aquatic vegetation was detected using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), a widely used indicator of photosynthetically active vegetation derived from red and near-infrared reflectance. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated for each image as $(B8 - B4)/(B8 + B4)$. Monthly median NDVI composites were generated from all valid scenes per month (6–16 images; mean ≈ 11). Pixels with $NDVI \geq 0.40$ were classified as vegetation-covered water surfaces, primarily representing aquatic macrophytes such as *H. verticillata* and *E. crassipes*; lower values were considered open water or unvegetated surfaces. This threshold was selected to conservatively separate dense macrophyte cover from open or turbid water, which typically exhibits substantially lower NDVI values in shallow lagoon environments, and is consistent with NDVI-based approaches commonly used for detecting aquatic vegetation in multispectral imagery (Cho *et al.*, 2008; Song and Park, 2020). For each month, the water surface area covered by aquatic vegetation was calculated as the sum of all AOI pixels with

Para cada mes, el área de superficie acuática cubierta por vegetación se calculó como la suma de todos los píxeles del AOI con $NDVI \geq 0,40$, multiplicada por el área del píxel y expresada en kilómetros cuadrados. Los píxeles contaminados por nubes o inválidos se excluyeron de todos los cálculos, por lo que las estimaciones representan únicamente la porción del AOI efectivamente observada y libre de nubes.

La clasificación basada en satélite fue respaldada por verificaciones en campo realizadas en varias ocasiones entre septiembre de 2025 y enero de 2026. Las observaciones confirmaron que las áreas identificadas como vegetadas en las composiciones NDVI correspondían a superficies de agua efectivamente cubiertas por vegetación. El 21 de enero de 2026 se recolectaron fotografías y muestras de vegetación en la ciénaga de Machete ($10^{\circ}50'52,54''$ N; $74^{\circ}31'18,90''$ O) y la Ciénaga El Placer ($10^{\circ}50'36,19''$ N; $74^{\circ}30'21,44''$ O), con el fin de documentar e identificar las macrófitas dominantes, incluyendo *E. crassipes* e *H. verticillata*.

Para cada mes se exportaron a formato CSV la superficie cubierta por vegetación (km^2), el número de escenas Sentinel-2 válidas y la fracción de píxeles sin nubes del AOI. Adicionalmente, se generaron mapas mensuales de NDVI para inspección visual. Todos los análisis emplearon la misma geometría del AOI, umbrales de NDVI, reglas de enmascaramiento de nubes y pasos de procesamiento, garantizando plena consistencia temporal. Los scripts completos de Google Earth Engine utilizados en este estudio están disponibles públicamente a través de Zenodo ([Salzwedel et al., 2025](#)).

Se generaron un total de 19 composiciones mensuales de NDVI para el período julio de 2024–enero de 2026, cada una derivada de entre 6 y 16 escenas Sentinel-2 (promedio ≈ 11 ; [Tabla 1](#)). La inclusión de todas las imágenes filtradas por nubosidad para cada mes en el cálculo de la mediana pixel a pixel produjo composiciones temporalmente representativas, minimizando la influencia de valores atípicos. La proporción de píxeles válidos (sin nubes) dentro del AOI se mantuvo consistentemente alta, generalmente entre 0,96 y 0,99 (promedio = 0,99), lo que indica una excelente cobertura espacial en el área de estudio de $60.7 km^2$. Las pruebas de sensibilidad realizadas con métodos alternativos de enmascaramiento de nubes y con umbrales de NDVI cercanos produjeron resultados comparables, lo que confirma la robustez de la expansión de la vegetación observada. Esta combinación de un muestreo temporal denso y una baja interferencia de nubes

$NDVI \geq 0.40$, multiplied by pixel area and expressed in km^2 . Cloud-contaminated and invalid pixels were excluded from all calculations, so area estimates represent only the effectively observed, cloud-free portion of the AOI. The resulting values therefore quantify the fraction of open-water surface occupied by floating and submerged macrophytes, rather than total lagoon area.

Satellite-based classification was supported by field verification conducted on multiple occasions between September 2025 and January 2026. Field observations confirmed that areas identified as vegetated in the NDVI composites corresponded to actual vegetation-covered water surfaces. On 21 January 2026, photographs and vegetation samples were collected at Ciénaga de Machete ($10^{\circ}50'52.54''$ N, $74^{\circ}31'18.90''$ W) and Ciénaga El Placer ($10^{\circ}50'36.19''$ N, $74^{\circ}30'21.44''$ W) to document and identify dominant aquatic macrophytes, including *E. crassipes* and *H. verticillata*.

For each month, vegetation-covered water surface area (km^2), number of valid Sentinel-2 scenes, and the fraction of cloud-free AOI were exported as a CSV file. Monthly NDVI maps were additionally generated for visual inspection. All analyses used identical AOI geometry, NDVI thresholds, cloud-masking rules, and processing steps, ensuring full temporal consistency. The complete Google Earth Engine scripts used in this study are publicly available via Zenodo ([Salzwedel et al., 2025](#)).

A total of 19 monthly NDVI composites were generated for the period July 2024 – January 2026, each derived from between 6 and 16 (mean ≈ 11) individual Sentinel-2 scenes ([Table 1](#)). All available cloud-filtered images for each month were included in the pixel-wise median NDVI computation, resulting in temporally representative composites that minimize the influence of outliers. The proportion of valid (non-clouded) pixels within the AOI remained consistently high, typically ranging from 0.96 to 0.99 (mean = 0.99), indicating excellent spatial coverage across the $60.7 km^2$ study area. This combination of dense temporal sampling and low cloud interference provides high confidence in the accuracy and stability of the monthly vegetation-covered area estimates derived from the $NDVI \geq 0.40$ threshold. Sensitivity tests using alternative cloud masking and nearby NDVI thresholds produced comparable results, confirming the robustness of the observed vegetation expansion. The time-series analysis reveals a steady and largely continuous expansion of aquatic vegetation within the area of interest (AOI) over the 19-month observation period. Vegetation-covered surface area

proporciona una alta confianza en la precisión y estabilidad de las estimaciones mensuales del área cubierta por vegetación derivadas del umbral de NDVI $\geq 0,40$. El análisis de la serie temporal revela una expansión sostenida y en gran medida continua de la vegetación acuática dentro del AOI a lo largo de los 19 meses de observación. El área cubierta por vegetación aumentó de menos de 2 km² en julio de 2024 a más de 44 km² en enero de 2026, lo que equivale a cerca de tres cuartas partes del área investigada. Un incremento marcado se registró entre finales de 2024 y comienzos de 2025, seguido por un crecimiento sostenido durante el resto de 2025 (Figura 2).

Tabla 1. Estimaciones mensuales derivadas del NDVI de la cobertura de vegetación acuática dentro del Complejo Pajarales (CGSM), incluyendo el número de escenas válidas de Sentinel-2 y la fracción de píxeles sin nubes por compuesto. Los valores entre paréntesis se consideran poco fiables; véase el texto para obtener más explicaciones.

Mes / Month	Área con vegetación / Vegetated area (km ²)	Número de escenas válidas de Sentinel-2 / No. of valid Sentinel-2 scenes	Fracción de píxeles válidos (sin nubes) / Valid (cloud-free) pixel fraction
2024-07	1.65	10	0.993
2024-08	1.64	7	0.993
2024-09	2.22	7	0.991
2024-10	2.92	11	0.993
2024-11	4.78	9	0.993
2024-12	8.55	12	0.993
2025-01	18.96	12	0.993
2025-02	20.01	11	0.993
2025-03	(12.19)	12	0.993
2025-04	(14.34)	14	0.993
2025-05	21.50	13	0.955
2025-06	23.63	11	0.993
2025-07	23.59	16	0.993
2025-08	26.31	16	0.993
2025-09	26.40	14	0.993
2025-10	31.14	6	0.979
2025-11	36.09	10	0.993
2025-12	44.23	14	0.993
2026-01	48.09	11	0.993

increased from less than 2 km² in July 2024 to more than 44 km² by January 2026, corresponding to nearly three-quarters of the investigated area. A pronounced increase occurred between late 2024 and early 2025, followed by sustained growth throughout the remainder of 2025 (Figure 2).

Table 1. Monthly NDVI-derived estimates of aquatic vegetation coverage within the Pajarales Complex (CGSM), including number of valid Sentinel-2 scenes and fraction of cloud-free pixels per composite. Values in brackets are considered unreliable; see text for further explanation.

Área cubierta de vegetación en el Complejo Pajarales / Area covered with vegetation in Pajarales Complex

(dentro de un área investigada de aproximadamente / within an investigated area of ca. 60,7 km²)

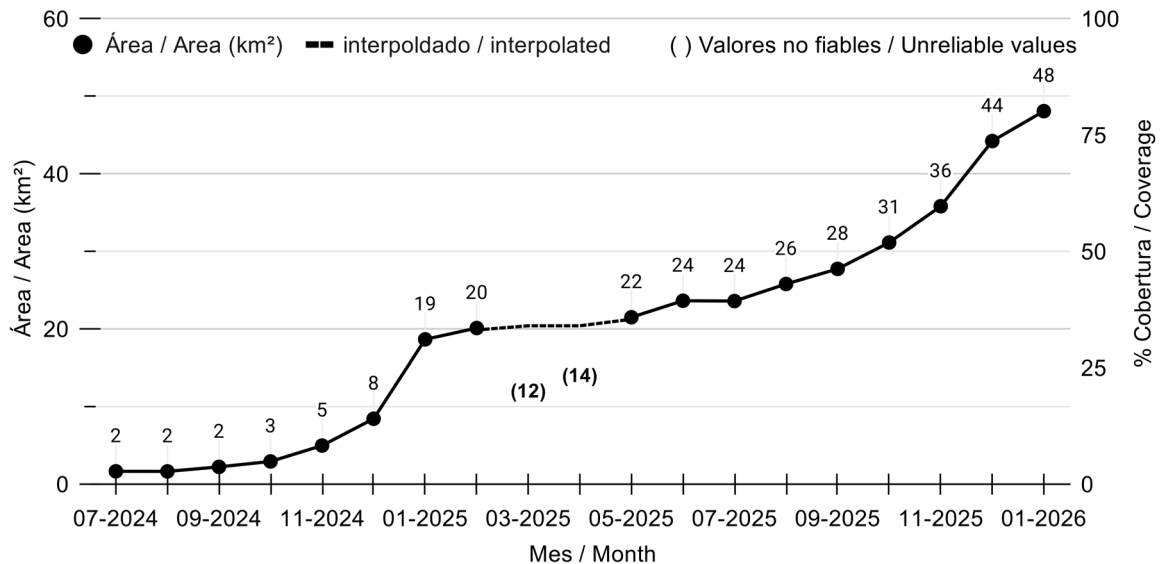


Figura 2. Área mensual observada de vegetación acuática en el Complejo Pajarales, Ciénaga Grande de Santa Marta (julio de 2024 - enero de 2026). Los valores que aparecen entre paréntesis indican estimaciones poco fiables afectadas por problemas técnicos. Los segmentos punteados representan la interpolación lineal entre observaciones fiables. El eje derecho muestra el porcentaje de cobertura correspondiente del área investigada (~60.7 km²).

Los valores correspondientes a marzo y abril de 2025 se consideran poco fiables. Durante estos meses la vegetación acuática estuvo presente, pero su señal espectral fue probablemente atenuada o mezclada con agua y sedimentos en suspensión, reduciendo los valores de NDVI por debajo del umbral utilizado para la clasificación. Esto produjo una subestimación temporal del área cubierta por vegetación. En la figura estos meses se indican separadamente y se conectan mediante interpolación lineal. Esta breve discontinuidad no afecta la tendencia general de expansión observada.

Desde el punto de vista espacial, la expansión de la vegetación acuática se concentró inicialmente a lo largo de los sectores occidental y central del AOI, particularmente en torno a Nueva Venecia y el canal adyacente Caño Aguas Negras, donde las condiciones protegidas y ricas en nutrientes favorecen una colonización temprana. En los meses posteriores se evidenció un relleno progresivo hacia el oriente y el suroriente de los parches de

Figure 2. Observed monthly aquatic vegetation area in the Pajarales Complex, Ciénaga Grande de Santa Marta (July 2024 - January 2026). Values shown in parentheses indicate unreliable estimates affected by technical issues. Dotted segments represent linear interpolation between reliable observations. The right axis shows the corresponding percentage coverage of the investigated area (~60.7 km²).

The values corresponding to March and April 2025 are considered unreliable. During these months, aquatic vegetation was present in the area, but its spectral signal was likely attenuated or mixed with water and suspended sediments, reducing NDVI values below the threshold used for classification. This resulted in a temporary underestimation of the vegetated area. In the figure, these months are indicated separately and connected by linear interpolation. This brief discontinuity does not affect the overall trend of vegetation expansion observed during the study period.

Spatially, the expansion of aquatic vegetation was initially concentrated along the western and central sectors of the AOI, particularly around Nueva Venecia and the adjacent Caño Aguas Negras channel, where sheltered and nutrient-rich conditions favor early colonization. Subsequent months revealed a progressive eastward and southeastward infilling of vegetation patches across the open-water portion of the Pajarales basin, gradually merging into larger, contiguous mats by mid-2025. The monthly NDVI

vegetación a través de la porción de aguas abiertas de la cuenca de Pajarales, los cuales fueron fusionándose gradualmente en mantos más extensos y continuos hacia mediados de 2025. Los mapas mensuales de superposición de NDVI ilustran claramente este patrón de propagación hacia el exterior, mostrando que las áreas cercanas a la periferia del poblado y alrededor de las zonas marginales someras fueron las primeras en presentar firmas persistentes de $NDVI \geq 0,40$. Al final del período de observación (enero de 2026), la mayor parte del área interior de la laguna presentaba una cobertura vegetal continua, mientras que solo permanecían espacios limitados de aguas abiertas cerca del límite oriental (Figura 3 y video de síntesis). Este patrón espacial se ve corroborado por evidencia fotográfica obtenida en campo. En septiembre de 2025, el poblado palafítico de Nueva Venecia ya se encontraba rodeado por un manto denso y continuo de vegetación flotante, compuesto principalmente por *E. crassipes* anclada a *H. verticillata* sumergida, lo que restringía severamente la navegación en aguas abiertas y las rutas de acceso (Figura 4). Las observaciones de campo realizadas en enero de 2026 confirmaron además que las firmas de $NDVI \geq 0,40$ detectadas por satélite corresponden efectivamente a superficies de agua cubiertas por vegetación. En la ciénaga de Machete, la cobertura de macrófitas observada in situ, aunque parcheada pero extensa, coincidió con la extensión espacial y la distribución derivadas de las imágenes Sentinel-2 (Figura 5).

overlay maps clearly illustrate this outward propagation pattern, showing that areas near the village's periphery and around shallow marginal zones were the first to exhibit persistent $NDVI \geq 0.40$ signatures. By the end of the observation period (January 2026), most of the interior lagoon area displayed continuous vegetation coverage, while only limited open-water spaces remained near the eastern boundary (Figure 3 and summarizing video). This spatial pattern is corroborated by on-site photographic evidence. In September 2025, the stilt village of Nueva Venecia was already surrounded by a dense, continuous carpet of floating vegetation, primarily *Eichhornia crassipes* anchored to submerged *Hydrilla verticillata*, severely constraining open-water navigation and access routes (Figure 4). Field observations conducted in January 2026 further confirmed that satellite-detected $NDVI \geq 0.40$ signatures correspond to actual vegetation-covered water surfaces. At ciénaga de Machete, patchy but extensive macrophyte cover observed in situ matched the spatial extent and distribution derived from Sentinel-2 imagery (Figure 5).

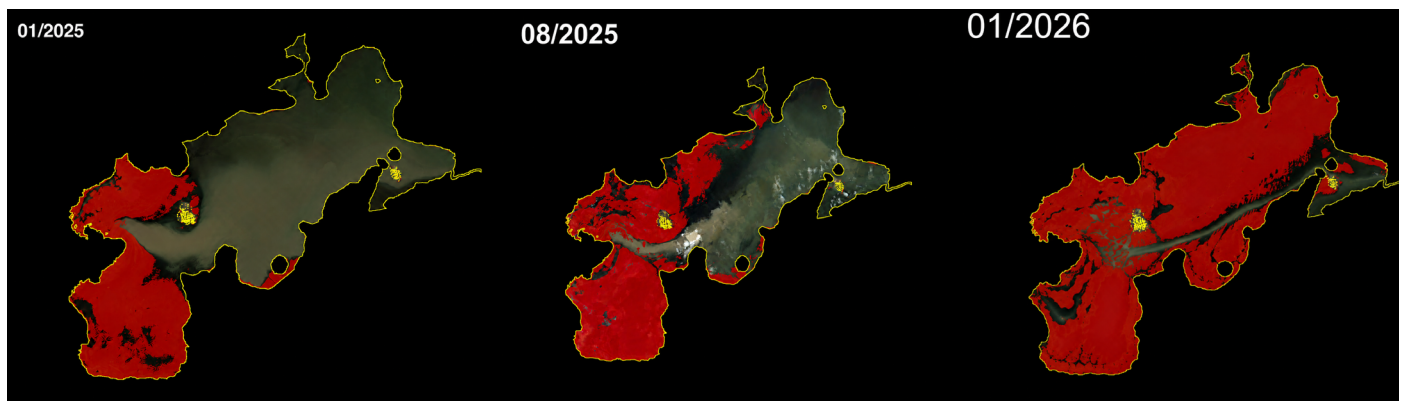


Figura 3. Expansión mensual de la vegetación acuática en el Complejo Pajarales, Ciénaga Grande de Santa Marta, ilustrada mediante mapas superpuestos del NDVI para tres meses seleccionados (enero, agosto de 2025 y enero de 2026). Las superposiciones rojas indican superficies acuáticas cubiertas de vegetación ($NDVI \geq 0,40$), principalmente *Eichhornia crassipes* e *Hydrilla verticillata*. Los puntos amarillos marcan las aldeas palafitas de Nueva Venecia (al oeste) y Buenavista. Un [vídeo](#) muestra la evolución de la cobertura de la superficie del agua.

Figure 3. Monthly expansion of aquatic vegetation in the Pajarales Complex, Ciénaga Grande de Santa Marta, illustrated using NDVI overlay maps for three selected months (January, August 2025, and January 2026). Red overlays indicate vegetation-covered water surfaces ($NDVI \geq 0.40$), mainly *Eichhornia crassipes* and *Hydrilla verticillata*. The yellow dots mark the stilt villages of Nueva Venecia (to the west) and Buenavista. A [video](#) shows the development of the water surface coverage.



Figura 4. El palafito de Nueva Venecia el 24 de septiembre de 2025, rodeada por una densa alfombra de vegetación compuesta principalmente por *Eichhornia crassipes*, adherida a la *Hydrilla verticillata* que crece bajo el agua. Foto: Horst Salzwedel. Publicado por primera vez en Salzwedel (2025).

Figure 4. The stilt village of Nueva Venecia on September 24, 2025, surrounded by a dense carpet of vegetation consisting mainly of *Eichhornia crassipes*, clinging to the underwater growing *Hydrilla verticillata*. Photo: Horst Salzwedel. First published in Salzwedel (2025).



Figura 5. La ciénaga de Machete ($10^{\circ}50'52.54''$ N, $74^{\circ}31'18.90''$ W) el 21 de enero de 2026, confirmando la capa vegetal visible en la imagen satelital. Foto: Jhon Cantillo Ruiz.

Figure 5. La ciénaga de Machete ($10^{\circ}50'52.54''$ N, $74^{\circ}31'18.90''$ W) on January 21, 2026, confirming the vegetation cover visible in the satellite image. Photo: Jhon Cantillo Ruiz.

En conjunto, la expansión observada de la vegetación acuática dentro del Complejo de Pajarales indica una transformación ecológica continua de esta subcuenca de la CGSM. El incremento consistente, mes a mes, de la superficie cubierta por vegetación, junto con la disponibilidad de datos de alta calidad y libres de nubosidad, resalta la persistencia y propagación de las comunidades de macrófitas bajo las condiciones hidrológicas y nutricionales predominantes.

El flujo de trabajo basado en NDVI aplicado en este estudio demostró ser eficaz para detectar tanto tendencias temporales como dinámicas espaciales de la cobertura vegetal a alta resolución, proporcionando una base confiable para el monitoreo continuo del cambio ecológico en el sistema de humedales. Estos resultados demuestran la idoneidad de las imágenes Sentinel-2 y del procesamiento automatizado en Google Earth Engine para evaluaciones de largo plazo de la dinámica de la vegetación acuática en lagunas costeras tropicales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al señor Jhon Cantillo Ruiz, descendiente de pescadores de Nueva Venecia y director de la iniciativa de turismo regenerativo Ciénaga Mágica, por las fotografías tomadas y el muestreo de las plantas acuáticas el 21 de enero de 2026, y al Profesor Orlando Rivera del ICN – Universidad Nacional de Colombia por identificar las especies vegetales.

Overall, the observed expansion of aquatic vegetation within the Pajarales Complex indicates a continuing ecological transformation of this sub-basin of the CGSM. The consistent month-to-month increase in vegetation-covered surface, coupled with high-quality cloud-free data, highlights the persistence and spread of macrophyte communities under prevailing hydrological and nutrient conditions. The NDVI-based workflow applied here proved effective for detecting both temporal trends and spatial dynamics of plant cover at high resolution, providing a reliable foundation for ongoing monitoring of ecological change in the wetland system. These results demonstrate the suitability of Sentinel-2 imagery and automated processing in Google Earth Engine for long-term assessments of aquatic vegetation dynamics in tropical coastal lagoons.

ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge Mr. Jhon Cantillo Ruiz, a descendant of fishermen from Nueva Venecia and director of the regenerative tourism initiative Ciénaga Mágica, for the photographs and aquatic plant sampling carried out on January 21, 2026, and Professor Orlando Rivera (ICN, Universidad Nacional de Colombia) for the identification of the plant species.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Cheruiyot, E. K., Mito, C., Menenti, M., Gorte, B., Koenders, R. and Akdim, N. (2014). Evaluating MERIS-Based Aquatic Vegetation Mapping in Lake Victoria. *Remote Sensing*, 6(8), pp. 7762-7782. <https://doi.org/10.3390/rs6087762>
- Cho, H. J., Kirui, P. and Natarajan, H. (2008). Test of Multi-spectral Vegetation Index for Floating and Canopy-forming Submerged Vegetation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 5(5), pp. 477-483. <https://doi.org/10.3390/ijerph5050477>
- Google Earth (2026). *High-resolution satellite imagery of Nueva Venecia, Ciénaga de Pajara, Colombia*. Imagery © CNES/Airbus, acquisition dates 19 January 2022–9 December 2023. <https://earth.google.com>
- Hofstra, D.E., Clayton, J., Greena, J.D. and Augera, M. (1999). Competitive performance of *Hydrilla verticillata* in New Zealand. *Aquatic Botany* 63: pp. 305 - 324
- Invemar. (2024). *Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta*. Informe Técnico Final 2023 23; Santa Marta: Invemar, p. 185. <https://www.invemar.org.co/documents/37438/390230/ITF+CGSM+2024.pdf/e9fd6a92-8907-97aa-1cd8-c2d304277f1b?t=1739220946728>
- Karakus, P. (2025). Detection of water surface using Canny and Otsu threshold methods with machine learning algorithms on Google Earth Engine: A case study of Lake Van. *Applied Sciences*, 15(6), pp. 2903. <https://doi.org/10.3390/app15062903>
- Kumar, A., Cooper, C., Remillard, C., Ghosh, S., Haney, A., Braun, F., Conner, Z., Page, B., Boyd, K., Wilde, S. and Mishra, D. (2019). Spatiotemporal monitoring of *Hydrilla* (L. f.) Royle to aid management actions. *Weed Technology*, 33, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1017/wet.2019.13>
- Langeland, K.A. (1996). *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle (Hydrocharitaceae), "The perfect aquatic weed". *Castanea* 61, pp.293–304.
- 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), pp. 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Ortuño López, G., (2026). La planta invasora que avanza en silencio y pone en alerta a la Ciénaga Grande, el humedal costero más importante de Colombia. Mongabay. [online] Available at: <https://es.mongabay.com/2026/01/planta-invasora-colombia-cienaga-grande/>
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), pp. 62–66.
- Salzwedel, H. (2025). Régimen hídrico Ciénaga Grande de Santa Marta - *Hydrilla verticillata*. CEMarin. <https://cemarin.org/es/regimen-hidrico-cienaga-grande-de-santa-marta/>
- Salzwedel, H., Mejía-Rentería, C. and Mancera, J. (2025). *Sz-Col/CGSM: NDVI-based aquatic vegetation monitoring – Complejo Pajarales (CGSM, Colombia)* [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17594501>
- Shrivastava, M. and Srivastava, S. (2021). Application and research progress of *Hydrilla verticillata* in ecological restoration of water contaminated with metals and metalloids. *Environmental Challenges* 4:100177.

