



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



<https://doi.org/10.14483/2256201X.24278>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

ISSN 0120-0739 • e-ISSN 2256-201X

Evaluación de la precisión de índices de vegetación específicos para identificar manglares en Tumaco, Colombia

Assessment of the accuracy of specific vegetation indices for mangrove identification in Tumaco, Colombia

Nelsy E. Jacome-Torres ^a, Mauricio A. Perea-Ardila ^b,
Miguel Á. Quimbayo-Cardona ^a, Milena A. Segura-Madriral ^a

^a Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.

^b Universidad Federal de Ceará. Fortaleza, Brasil.

Autor para correspondencia

Recibido: 20 de octubre de 2025

Aceptado: 27 de abril de 2026

Citación: Jacome-Torres, N. E., Perea-Ardila, M. A., Quimbayo-Cardona, M. Á., & Segura-Madriral, M. A. (2026). Evaluación de la precisión de índices de vegetación específicos para identificar manglares en Tumaco, Colombia. *Colombia Forestal*, 29(2), e24278.

<https://doi.org/10.14483/2256201X.24278>

Highlights

- Evaluación de siete índices de vegetación para identificar manglares
- MI mostró mejor equilibrio entre precisión y coherencia espacial
- MVI sobreestimó áreas de manglar en más del 500%
- CMRI logró mayor precisión global, pero con sobreestimación espacial
- Se requiere adaptación regional de índices para mejorar su precisión

Resumen

El estudio evaluó la precisión de siete índices de vegetación específicos para la identificación de manglares mediante imágenes Sentinel-2 en San Andrés de Tumaco, Colombia. Se emplearon análisis espectrales, validación con datos de referencia e interpretación visual. El Índice de Vegetación de Manglares sobreestimó el área (>500%), mientras que el Índice de Manglares mostró los mejores resultados visuales, aunque con limitaciones en zonas acuáticas. El Índice de Manglares de Diferencia Normalizada y el Índice de Discriminación de Manglares lograron diferenciar coberturas de agua y urbanas, con desafíos en la separabilidad del manglar. La firma espectral evidenció mayor absorción en el infrarrojo cercano (0.32), permitiendo su distinción frente a otras coberturas. Los resultados destacan la necesidad de adaptar los índices a condiciones ecológicas regionales para optimizar su precisión, constituyendo una

base para desarrollar metodologías más robustas de monitoreo y conservación de manglares mediante teledetección.

Palabras clave: monitoreo de manglares, Pacífico colombiano, Sentinel-2, teledetección

Abstract

The study assessed the accuracy of seven vegetation indices specifically designed for mangrove identification using Sentinel-2 imagery in San Andrés de Tumaco, Colombia. Spectral analyses, validation with reference data, and visual interpretation were conducted. The Mangrove Vegetation Index substantially overestimated the mapped area (>500%), whereas the Mangrove Index yielded the best visual results, albeit with limitations in water-dominated zones. The Normalized Difference Mangrove Index and the Mangrove Discrimination Indices effectively differentiated water and urban land covers, though challenges remained in mangrove separability. Spectral signatures revealed greater absorption in the near-infrared region (0.32), facilitating discrimination from other land covers. The findings underscore the need to adapt these indices to regional ecological conditions to improve their accuracy, providing a foundation for the development of more robust remote sensing methodologies for mangrove monitoring and conservation.

Keywords: Mangrove monitoring, Colombian pacific, Sentinel-2, remote sensing

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de manglar son una de las formaciones vegetales más importantes en las zonas costeras tropicales y subtropicales del planeta (Wilkie & Fortuna, 2003). Estos ecosistemas contribuyen a la protección de las costas, el secuestro de carbono y la provisión de hábitat para numerosas especies (Duarte *et al.*, 2013). Sin embargo, la continua presión antrópica y los efectos del cambio climático han generado una creciente necesidad de desarrollar metodologías precisas para su monitoreo y conservación (Alongi, 2008).

La identificación de manglares mediante teledetección ha llevado al desarrollo de diversos índices de vegetación (IV) específicos que buscan optimizar su discriminación frente a otros tipos de cobertura (Tran *et al.*, 2022). Además, las imágenes capturadas de sensores remotos como Sentinel-2 ofrecen capacidades únicas para la identificación y caracterización de manglares a gran escala (Perea-Ardila & Murillo-Sandoval, 2024), con una resolución espacial de 10 m y la disponibilidad de bandas espectrales específicas que permiten distinguir características de los manglares, que no son posibles de identificar con sensores de menor resolución (Bunting *et al.*, 2018).

Actualmente, se presentan siete índices destacados en la literatura científica: el Índice Combinado de Reconocimiento de Manglares (CMRI) (Gupta *et al.*, 2018), el Índice de Diferencia Normalizada de Manglares (NDMI) (Shi *et al.*, 2016), el Índice de Vegetación de Manglares (MVI) desarrollado por (Baloloy *et al.*, 2020), el Índice de Manglar (MI) (Winarso & Purwanto, 2014), el Índice Modular de Reconocimiento de Manglares (MMRI) (Diniz *et al.*, 2019) y los Índices de Discriminación de Manglares (MDI 1 y MDI 2) (Wang *et al.*, 2018). Los índices mencionados anteriormente han demostrado diferentes niveles de efectividad dependiendo de las condiciones locales y factores ambientales específicos de cada región de estudio (Tran *et al.*, 2022).

Por otro lado, estudios como el de [Perea-Ardila & Murillo-Sandoval \(2024\)](#) señalaron que trabajos anteriores de índices de vegetación de manglares han sido evaluados principalmente en el continente asiático, donde se analizan aspectos relacionados a la eficiencia de la delimitación del manglar y su densidad ([Baloloy et al., 2020](#); [Gupta et al., 2018](#); [Shi et al., 2016](#); [Wang et al., 2018](#); [Winarso & Purwanto, 2014](#)). En América Latina, se han identificado estudios específicos en toda la costa de Brasil como el de [Diniz et al. \(2019\)](#) y en Colombia se han evaluado algunos de estos índices en los manglares del Caribe como en los estudios de [Ruiz-Roldán et al. \(2023\)](#) y en el Pacífico por [Perea-Ardila & Murillo-Sandoval \(2024\)](#).

Autores como [Tran et al. \(2022\)](#) destacan que el estudio de índices espectrales específicos para manglares sigue siendo una necesidad a escala global, especialmente en ecosistemas tropicales. En estos contextos, el monitoreo en campo enfrenta importantes limitaciones logísticas debido a condiciones ambientales extremas y a la persistente cobertura nubosa ([Perea-Ardila et al., 2021](#)). El uso de índices específicos aplicados a imágenes satelitales libres de nubes se presenta como una alternativa eficaz, al permitir el análisis de los manglares a mayor escala y con mayor eficiencia en regiones tropicales ([Wang et al., 2018](#)). En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál de los índices de vegetación específicos de los manglares es el más preciso para su identificación en San Andrés de Tumaco?

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la precisión de los índices de vegetación específicos para la identificación de los ecosistemas de manglar en San Andrés de Tumaco, Colombia, utilizando imágenes Sentinel-2 libres de nubes, con el fin de identificar el índice más adecuado para estudiar estas coberturas en las condiciones climáticas del Pacífico colombiano. Los resultados obtenidos podrán servir como base para la detección de pérdida de cobertura y fragmentación, proporcionando una base técnica para el monitoreo forestal y la implementación de análisis más especializados ante cambios significativos en la cobertura de manglar. Por otra parte, proporciona nuevos elementos para la comprensión de la respuesta espectral de estos ecosistemas bajo condiciones ambientales típicas del Pacífico colombiano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de San Andrés de Tumaco, departamento de Nariño, en la costa Pacífica de Colombia, comprendida entre las coordenadas geográficas 1°22'8.580" a 2°4'15.312" N y 78°32'24.9" a 79°3'2.412" W abarcando un área de 167.051 ha ([Figura 1](#)). Esta región costera presenta condiciones ambientales características de los ecosistemas de manglar del Pacífico colombiano. La zona delimitada comprende área marina y costera que se caracteriza por una compleja configuración litoral con múltiples estuarios, bahías y canales que crean un mosaico de hábitats intermareales ([Tavera-Escobar, 2010](#)).

El municipio de San Andrés de Tumaco presenta una temperatura promedio de 26.1°C, una precipitación media anual de 3066.9 mm y una humedad relativa promedio de 85.2% ([Gómez-Torres & Peñaranda-Cabarcas, 2012](#); [Valoyes-Cardozo et al., 2014](#)). El área está representada por diferentes tipos de cobertura vegetal incluyendo bosques de manglar bien desarrollados, áreas degradadas por actividades antropogénicas, cuerpos de agua intermareales y parches de vegetación secundaria en diferentes estados de sucesión ([Tavera-Escobar, 2010](#)).

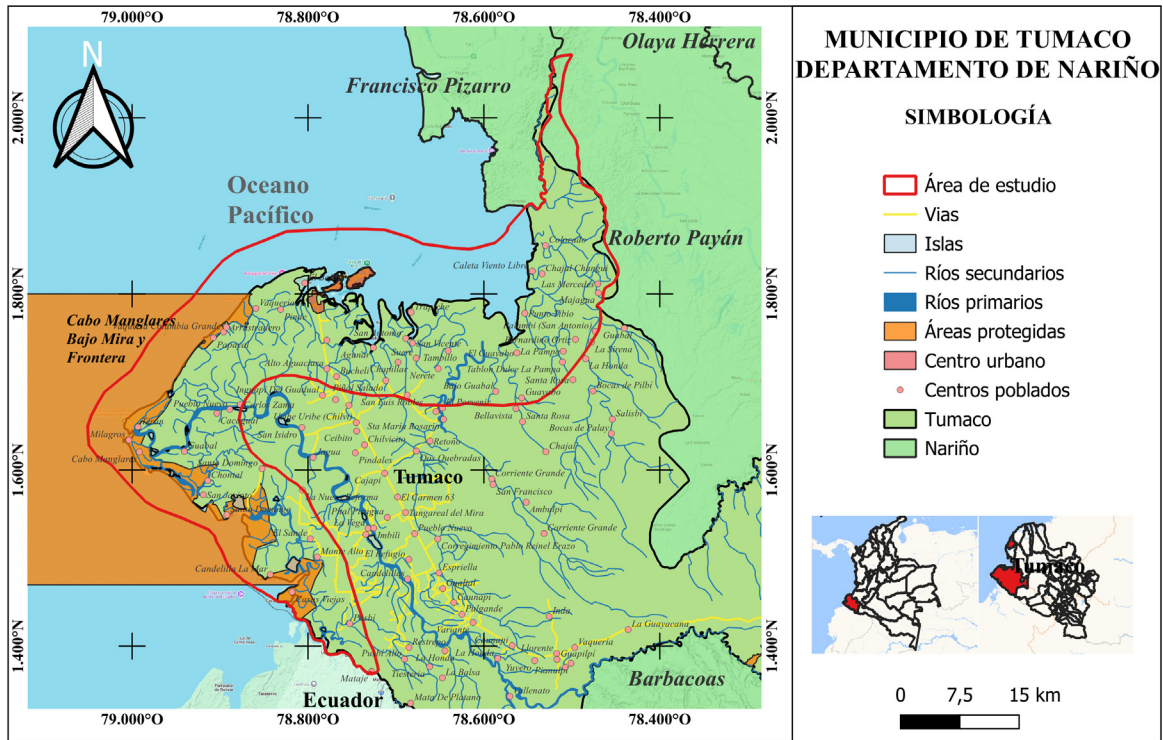


Figura 1. Localización del área de estudio

El ecosistema de manglar de Tumaco está dominado por cuatro especies, mangle rojo (*Rhizophora mangle* L.), mangle negro (*Avicennia germinans* (L.) L.), mangle blanco (*Laguncularia racemosa* (L.) G.F. Geartn.) y mangle piñuelo (*Pelliciera rhizophorae* Triana & Planch.) distribuidas en la línea costera de la bahía, cuyas fronteras se ubican en Cabo Manglares y la desembocadura del río Colorado (Klinger et al., 2012). Estas especies se identifican fácilmente por la fisonomía de sus raíces, debido a que nacen en la copa o el tallo del árbol y crecen hacia abajo para luego anclarse al suelo inundado; este sistema es esencial en la formación de nuevos suelos (Lamprecht, 1990). Por el contrario, el Mangle blanco, se encuentra generalmente en áreas que han sufrido degradación (Rodríguez-Rodríguez, 2022).

Procesamiento del mosaico Sentinel 2

Se descargó un mosaico multispectral anual de Sentinel-2 de 2020 ("Sentinel-2 L1C cloud-free composites") desde Google Earth Engine, el cual es una composición pantropical libre de nubes de Sentinel-2 para el periodo de 2020 construido mediante el cálculo de los valores *Top of Atmosphere* (TOA) medios anuales por banda, enmascarando nubes y sombras según las condiciones tropicales. Asimismo, se reescalaron los

valores digitales a profundidad de ocho bits (rango 0-255) empleando un factor de 0.051 para optimizar la visualización y el tamaño del producto (Simonetti *et al.*, 2021).

En la descarga del mosaico, se seleccionaron seis bandas espectrales (B2, B3, B4, B8, B8A y B11) las cuales fueron remuestreadas a una resolución de 20 m mediante el algoritmo del vecino más cercano, para estandarizar la unidad de análisis y optimizar el procesamiento de los datos. La selección de las bandas se cimentó en su capacidad para capturar la respuesta espectral de ecosistemas complejos y los parámetros biofísicos de la vegetación (Frampton *et al.*, 2013), especialmente, las bandas B8A y B11 que permiten identificar variaciones en elementos claves para el monitoreo de bosques tropicales (Simonetti *et al.*, 2021). Dentro de los parámetros de búsqueda relevantes para su descarga, se identificó la fecha de inicio: 01 de enero del 2020, la fecha final: 31 de diciembre de 2020, el porcentaje de nubes: máximo del 20%, el algoritmo de procesamiento: PINO26 y en las opciones de reescalado se seleccionó: 0-255 (8bits).

Por otro lado, se utilizó la base de datos del producto WorldCover, el cual es un mapa global de clasificación de 11 coberturas terrestres de alta resolución para el año 2020, con una precisión del 75% de la Agencia Espacial Europea (ESA) (Zanaga *et al.*, 2021), junto con la información proporcionada en la Cartografía Oficial de Manglares de Colombia, desarrollada por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras de Colombia (INVEMAR) (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras [INVEMAR], 2023), con el fin de efectuar la validación oportuna de las coberturas de manglar a identificar en el mosaico Sentinel-2.

Primeramente, se efectuó la identificación visual de los manglares mediante las siguientes combinaciones de bandas espectrales: color natural (B4-B3-B2), falso color (B8-B4-B3), agricultura (B8-B11-B2), análisis de vegetación (B8-B11-B4), vegetación vigorosa (B8A-B11-B2) y tierra/agua (B8A-B11-B4) (Perea-Ardila *et al.*, 2021). En estas composiciones se analizaron elementos visuales claves a escala (1:15 000) como el color, tonalidad, forma, textura y patrón espacial de las coberturas (Melo-Wilches & Camacho-Chávez, 2005).

Luego, se efectuó la firma espectral promedio de los manglares, donde se seleccionaron 600 puntos aleatorios en áreas identificadas como manglar, con el fin de garantizar la representatividad estadística, capturar la variabilidad fenológica y estructural del ecosistema de manglar del área de estudio, según los criterios de densidad muestral para coberturas forestales heterogéneas (Congalton & Green, 2019). Adicionalmente, se seleccionaron 50 puntos para otras coberturas (agua, suelo desnudo, agricultura, urbanización y bosque), validadas mediante la clasificación del ESA WorldCover (Zanaga *et al.*, 2021) y procesadas con el plugin Semi-Automatic Classification (SCP) en QGIS 3.34, donde se calcularon los valores espectrales para cada cobertura.

Este procedimiento se empleó con el fin de identificar el rango de valores de reflectancia correspondiente a los manglares del área de estudio y evidenciar su diferenciación frente a otras coberturas. Por último, la separabilidad espectral entre el manglar y las demás coberturas se evaluó mediante el Estadístico M, el cual cuantifica el grado de solapamiento entre histogramas. Se consideró que valores de $M > 1.0$ indican una separabilidad adecuada (Wang *et al.*, 2019).

Índices de vegetación específicos

Los IV específicos para manglares se implementaron siguiendo los parámetros detallados en la [Tabla 1](#). El procesamiento se efectuó mediante la selección de las bandas correspondientes y la aplicación algebraica de sus ecuaciones. Con los resultados obtenidos, se realizó una validación cruzada, comparando los rangos observados en el área de estudio con los límites documentados en la literatura científica. Lo anterior, se efectuó con el fin de validar la exactitud de la aplicación, garantizar la coherencia de los datos y asegurar que los productos generados se encuentran dentro de los parámetros biofísicos esperados para el ecosistema de manglar.

Puntos de terreno verdadero (manglar y no manglar)

Se realizó una clasificación categórica de la vegetación para discriminar y validar las coberturas teniendo en cuenta la integración de sensores remotos y cartografía oficial nacional, con el metadato de manglares colombianos a escala 1:25 000 ([INVEMAR, 2023](#)), así como también internacional, con el producto ESA WorldCover de 10 m de resolución (2020) ([Zanaga et al., 2021](#)), como bases de terreno verdadero. A partir de los rangos de reflectancia definidos en el análisis de las firmas espectrales, se establecieron dos categorías: "Manglar", (vegetación costera validada por ambos metadatos), y "No manglar" (vegetación periférica clasificada como agua, suelo desnudo, agricultura, urbanización y bosque continentales) identificadas espectralmente y en el metadato del ESA WorldCover ([Zanaga et al., 2021](#)).

Tabla 1. Índices de vegetación para la identificación de manglares utilizados en San Andrés de Tumaco.

Índice	Ecuación	Rango	Fuente
Índice Combinado de Reconocimiento de Manglares (CMRI)	$CMRI = NDVI - NDWI$	-	Gupta et al. (2018)
Índice de Diferencia Normalizada de Manglares (NDMI)	$NDMI = \frac{SWIR2 - GREEN}{SWIR2 + GREEN}$	-1 a 1	Shi et al. (2016)
Índice de Vegetación de Manglares (MVI)	$MVI = \frac{NIR - GREEN}{SWIR1 - GREEN}$	0 a 20	Baloloy et al. (2020)
Índice de Manglares (MI)	$MI = \frac{\left(\frac{NIR - SWIR}{NIR * SWIR} \right)}{10000}$	-1 a 1	Winarso & Purwanto (2014)
Índice Modular de Reconocimiento de Manglares (MMRI)	$MMRI = \frac{MNDWI - NDVI}{MNDWI + NDVI}$	-1 a 1	Diniz et al. (2019)
Índice de Discriminación de Manglares 1 (MDI-1)	$MDI1 = \frac{NIR - SWIR1}{SWIR1}$	NA	Wang et al. (2018)
Índice de Discriminación de Manglares 2 (MDI-2)	$MDI2 = \frac{NIR - SWIR2}{SWIR2}$	NA	Wang et al. (2018)

Para evaluar y validar la precisión de la separación categórica mencionada, se generaron 200 puntos aleatorios distribuidos equitativamente entre ambas categorías (Congalton, 1991). A partir de estos puntos, se extrajeron los valores de pixel para cada IV calculado, donde los umbrales de clasificación específicos se establecieron mediante el promedio y la desviación estándar. Lo anterior, permitió la delimitación estadística del manglar, cuya extensión fue cuantificada y comparada con las áreas estimadas por los metadatos de referencia, para determinar el grado de ajuste del modelo.

Evaluación de la precisión

La evaluación de la precisión de los IV específicos en la identificación del manglar de Tumaco, se realizó construyendo una matriz de confusión, comparando los resultados de la clasificación frente a los 200 puntos de verificación aleatoria (terreno verdadero). A partir de la cual, se calcularon los indicadores de Precisión del Productor (Pp), Precisión del Usuario (Pu) y Precisión Global (Pg) (Congalton & Green, 2019). Además, se determinó el índice Kappa (Cohen, 1960) para establecer el nivel de concordancia, los cuales se categorizaron bajo la escala de Landis & Koch (1977) que define la fuerza de concordancia como: Nula (0), Leve (0.01 a 0.20), Aceptable (0.21 a 0.40), Moderada (0.41 a 0.60), Considerable (0.61 a 0.80) y Casi Perfecta (0.81 a 1.0). La clasificación obtenida sirvió como indicador cuantitativo de la calidad del ajuste entre los datos observados y los resultados esperados, permitiendo una interpretación objetiva de la consistencia metodológica implementada en el estudio.

RESULTADOS

Una vez descargado el mosaico multispectral mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE) y su posterior recorte al área de estudio, se procedió a la evaluación de seis combinaciones de bandas Red-Green-Blue – Rojo-Verde-Azul (RGB), donde se observó que las combinaciones con la banda Infrarrojo de onda corta (SWIR) (B11), demostraron mayor separabilidad visual y contraste del entorno hidromórfico del manglar, frente a las otras coberturas vegetales (Figura 2). La composición Tierra/Agua, que incluye las bandas infrarrojo cercano (NIR), SWIR y Rojo (B8A-B11-B4), fue seleccionada como la más efectiva para los fines del estudio, ya que permitió identificar una segmentación clara, donde el manglar se visualiza en color marrón, de tonalidad oscura en comparación con las otras coberturas vegetales, las cuales se visualizan en color ocre y naranja brillante (Figura 3). Además, se identificó una rugosidad y textura granular en el dosel, característico de los manglares.

El análisis de la firma espectral permitió caracterizar el comportamiento reflectivo de las seis coberturas terrestres evaluadas en el área de estudio (Figura 4). Se observó que la cobertura de agua presentó la menor reflectancia (entre 3.8 y 11%), mientras que la urbanización y el suelo desnudo mostraron una tendencia ascendente hacia el infrarrojo de onda corta (SWIR) con valores entre 16.1 y 22.7%.

Por otro lado, las formaciones vegetales (manglares, bosques continentales mixtos y áreas agrícolas) presentaron un comportamiento típico de la vegetación, con una marcada reflectancia en la banda del Rojo y un aumento abrupto en el NIR. Sin embargo, se identificaron diferencias cuantitativas en sus picos de reflectancia: la cobertura de agricultura presentó el pico más alto en el NIR (44%), seguido por la cobertura de bosque (35%), mientras que el manglar presentó un comportamiento consistentemente inferior con un 32.3% de reflectancia, descendiendo hasta un 7.3% en la región del SWIR.

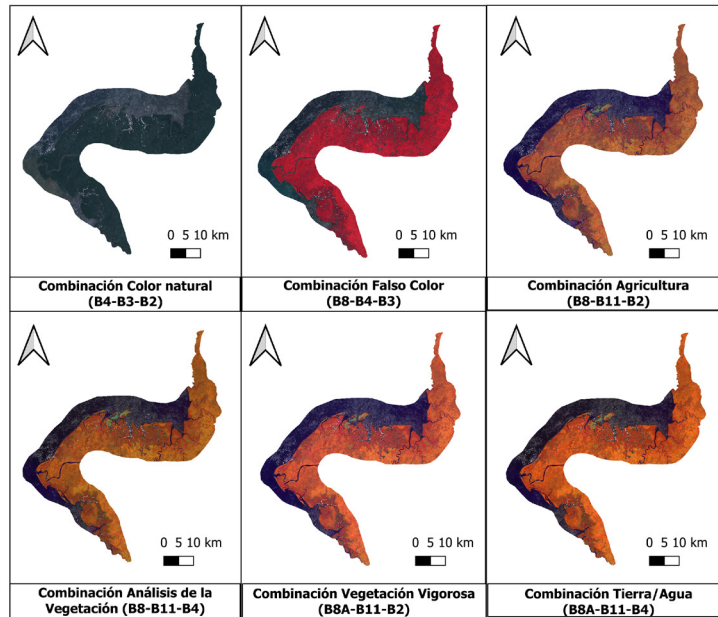


Figura 2. Comparación de combinaciones de bandas espectrales para la identificación visual de los manglares

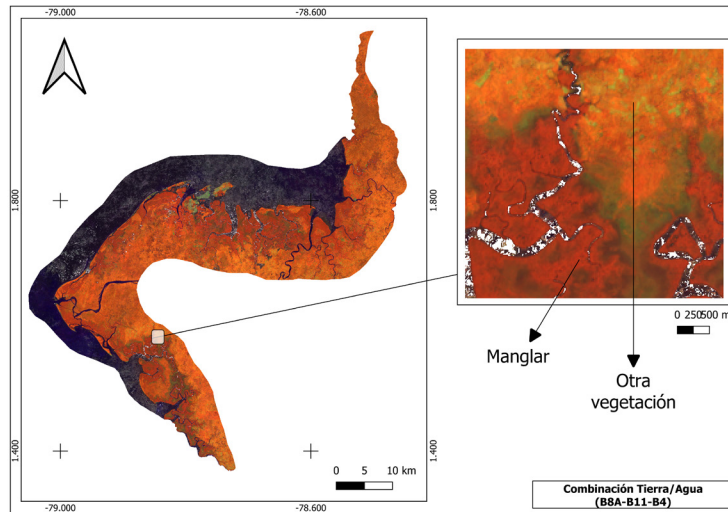


Figura 3. Combinación de banda de falso color infrarrojo Tierra/Agua (B8A-B11-B4) para la identificación visual de manglares

Esta variación sistemática en los valores del manglar, la cual se manifiesta en una reducción de la reflectancia en la banda NIR del 2.7% respecto a los bosques continentales y de hasta un 11.7% frente a las áreas agrícolas, permite establecer su diferenciación espectral frente a otras coberturas vegetales, evidenciando su capacidad de separabilidad espectral. Dicho fenómeno se atribuye a la influencia del entorno hidromórfico y la humedad del suelo que caracteriza estos ambientes, facilitando la separabilidad estadística de esta cobertura con las otras formaciones vegetales evaluadas.

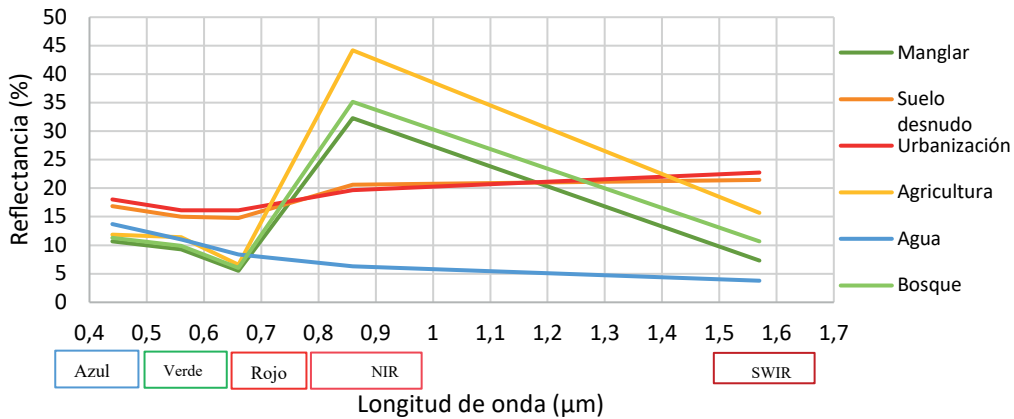


Figura 4. Firma espectral promedio de las coberturas en San Andrés de Tumaco

Frente al análisis comparativo de los IV específicos de los manglares, se presentaron diferencias en la capacidad de separabilidad visual de las coberturas. El MI mostró el mejor comportamiento visual al discriminar gradualmente las coberturas de manglar de las otras coberturas adyacentes, alcanzando un mayor acercamiento visual a los metadatos de referencia. Este índice permitió la identificación de formaciones hasta 10.5 km tierra adentro (Tabla 2). En contraste, el MVI presentó limitaciones técnicas considerables, mostrando valores de saturación que le impidieron distinguir adecuadamente las áreas de manglar frente a otras coberturas terrestres.

Por otro lado, el análisis estadístico descriptivo de los IV específicos para manglares, mostró variaciones en la distribución de sus valores (Tabla 3). Para observar el comportamiento general de los datos en una zona de gran extensión como el área de estudio, se contrastó la media aritmética (M) con la mediana (Me), identificándose registros predominantemente negativos para el NDMI ($Me = -0.76$) y el MMRI ($Me = -0.15$). En contraste, los índices restantes presentaron valores positivos, destacando el MI (Me de 0.10) y el MVI con el registro más elevado ($Me = 9.60$).

En cuanto a la dispersión, el MI se caracterizó por presentar una desviación estándar ($DS = 0.02$), que refleja una agrupación estrecha de los datos alrededor de su Me . Por el contrario, el MVI presentó la mayor variabilidad estadística con una $DS = 20.18$ y un valor mínimo (Min) y máximo (Max) de -81.00 y 92.00 respectivamente.

Con respecto al análisis comparativo de las áreas calculadas con los IV evaluados, se pusieron en evidencia las variaciones de la estimación del área de manglar. La mayoría de los índices presentaron una tendencia a la sobreestimación en comparación con los valores de área de los productos del INVEMAR (INVEMAR, 2023) y ESA WorldCover (Zanaga et al., 2021) (Figura 5). El MVI presentó las mayores tasas de sobreestimación, superando el 500% respecto a INVEMAR (INVEMAR, 2023) y más del 400% frente al metadato del ESA WorldCover (Zanaga et al., 2021). Los MDI1 y NDMI mostraron un comportamiento similar con sobreestimaciones del 91 y 53%, respectivamente. En contraste, el MI fue el único índice que presentó una subestimación del 12% frente al producto del ESA WorldCover (Zanaga et al., 2021), aunque también reflejó una sobreestimación del 10% con respecto al producto del INVEMAR (INVEMAR, 2023). Los MDI2, MMRI y CMRI presentaron sobreestimaciones intermedias, ubicándose entre el 80 - 130% frente a INVEMAR (INVEMAR, 2023) y entre 40 - 80%, respecto a la ESA WorldCover (Zanaga et al., 2021).

Tabla 2. Visualización de índices específicos de vegetación de manglares en San Andrés de Tumaco

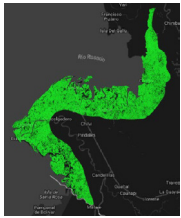
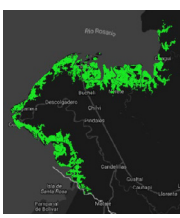

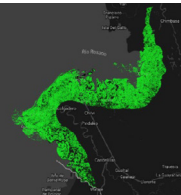
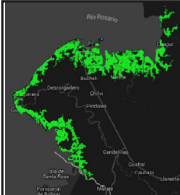



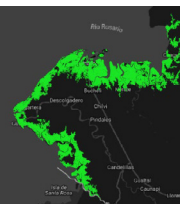
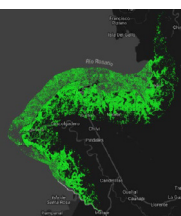


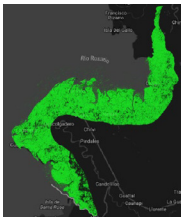


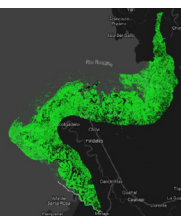

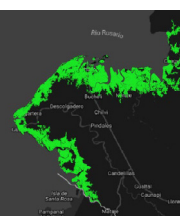
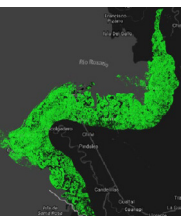

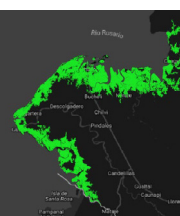
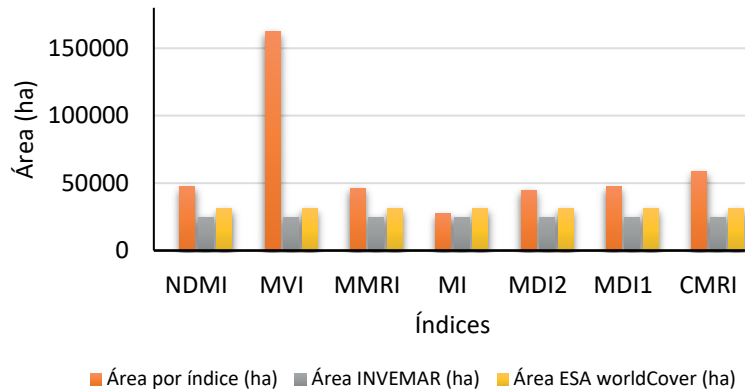
	Índices Sentinel-2	INVEMAR	WorldCover
CMRI			
NDMI			
MVI			
MI			
MMRI			
MDI-1			
MDI-2			

Tabla 3. Estadísticas descriptivas de los IV específicos de manglares

Estadístico	Índice						
	CMRI	NDMI	MVI	MI	MMRI	MDI-1	MDI-2
Min	0.76	-0.83	-81.00	0.05	-0.21	0.51	2.55
Max	1.34	-0.56	92.00	0.17	-0.08	2.30	9.87
<i>M</i>	1.11	-0.74	10.45	0.10	-0.15	1.40	6.06
<i>Me</i>	1.11	-0.76	9.60	0.10	-0.15	1.42	6.38
DS	0.11	0.06	20.18	0.02	0.02	0.39	1.75

Donde: Min: Mínimo; Max: Máximo; *M*: Media aritmética; *Me*: Mediana DS: Desviación estándar

**Figura 5.** Comparación de áreas de manglar según los índices específicos de vegetación

El análisis de concordancia reveló diferencias significativas entre los índices evaluados, donde el CMRI mostró un desempeño óptimo con precisión del productor y global del 100% y 84%, respectivamente, posicionándose junto al MMRI en el nivel de concordancia considerable según el índice Kappa (Tabla 4). En contraste, el MVI presentó valores notablemente inferiores, alcanzando apenas 46.8% y 44% en las métricas de precisión, mientras que su concordancia fue nula, similar al comportamiento observado en el NDMI. Estos hallazgos destacan la variabilidad en la efectividad de los índices analizados, evidenciando la superioridad relativa del CMRI en la identificación de manglares, aunque limitada por su sobreestimación de áreas.

En cuanto a los niveles de concordancia, el MDI-1, MDI-2 y MI mostraron valores de precisión del productor de 89.7, 86.3 y 85.9%, respectivamente. Respecto a la precisión global, se obtuvieron resultados diferenciados para cada índice evaluado: el MDI-1 alcanzó un 77%, mientras que el MDI-2 obtuvo un 76%, siendo el MI el que presentó mayor precisión con un 78%. Estos resultados demuestran que los tres índices presentan una capacidad similar en la identificación de coberturas de manglar, aunque con ligeras variaciones en su desempeño general.

Tabla 4. Matriz de confusión de los índices de vegetación específicos de manglares en San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia.

Indicadores de precisión	Índice						
	NDMI	MVI	CMRI	MDI-1	MDI-2	MI	MMRI
Pp (%)	85.9	46.8	100	89.7	86.3	85.9	97.2
Pu (%)	67.0	88.0	68.0	61.0	63.0	67.0	69.0
Pg (%)	78.0	44.0	84.0	77.0	76.5	78.0	83.5
Kappa	0	-0.12	0.68	0.54	0.53	0.56	0.67
Concordancia	Nula	Nula	Considerable	Moderada	Moderada	Moderada	Considerable

DISCUSIÓN

La evaluación de diversas combinaciones de bandas RGB permitió ratificar la complejidad presente en la discriminación del manglar frente a otras coberturas vegetales en Tumaco. Mientras que [Baloloy et al. \(2020\)](#) sugieren que las combinaciones de falso color son efectivas por la respuesta a la humedad, los resultados obtenidos demostraron que dicha efectividad está sujeta a la densidad de la masa forestal. Esto es consistente con lo expuesto por [Kuenzer et al. \(2011\)](#), quienes sostienen que la respuesta espectral del manglar no es uniforme y varía según las condiciones ambientales del ecosistema. En las combinaciones analizadas ([Figura 2](#)) se observó que el manglar presenta tonos oscuros, lo cual coincide con lo planteado por [Perea-Ardila et al. \(2021\)](#) sobre la absorción de luz en el SWIR por el contenido hídrico.

Respecto a la firma espectral de los manglares de Tumaco, se ratificó su diferenciación frente a otras coberturas, registrando valores de reflectancia del 32.3% en el NIR y 7.3% en el SWIR. Si bien los valores guardan relación con el comportamiento de absorción reportado por [Perea-Ardila & Murillo-Sandoval, \(2024\)](#), es necesario precisar que dichos registros son específicos para las condiciones del mosaico analizado en este estudio. [Fauzi et al. \(2025\)](#) indican que la respuesta espectral en manglares es altamente dinámica; en consecuencia, los umbrales variables complican las aplicaciones a gran escala como rangos referenciales absolutos para todas las fechas o sensores.

Frente a la evaluación de la precisión establecida, el desempeño del CMRI en Tumaco con una Pg = 84% y una concordancia considerable, presenta un comportamiento coherente con lo reportado por [Gupta et al. \(2018\)](#) en la India, donde el CMRI superó al NDVI. Sin embargo, es importante contrastar estos valores con un Pu = 68% para el CMRI; esta diferencia demuestra que, a pesar de su alto acierto general, el índice tiende a sobreestimar las áreas de manglar en el mosaico analizado. Este resultado evidencia una tensión metodológica entre la precisión basada en métricas de clasificación puntual y la coherencia espacial de la delimitación cartográfica. En este sentido, un alto desempeño en la matriz de confusión no necesariamente se traduce en una representación espacial precisa del ecosistema, especialmente en contextos de alta heterogeneidad como los manglares tropicales.

Por otro lado, la falla crítica observada en el NDMI y el MVI, cuyas concordancias fueron nulas, coincide con las advertencias de [Shi et al. \(2016\)](#) sobre la sensibilidad de los índices basados en la humedad a las condiciones locales. Además, la baja precisión del MVI frente a los buenos resultados de [Baloloy et al. \(2020\)](#) demuestra que la complejidad algorítmica no garantiza la estabilidad del índice en zonas donde la señal espectral se ve alterada.

El MI se consolidó como la herramienta más equilibrada para la identificación de manglares en San Andrés de Tumaco, con una $P_g = 78\%$, y una concordancia moderada ($Kappa: 0,56$). Aunque la P_u (67%) refleja retos en la discriminación fina del manglar, su alta precisión del productor (86%) demuestra su capacidad superior para capturar la extensión real frente a índices con concordancia nula como el MVI. La superioridad relativa del MI en este estudio, no solo reside en sus valores estadísticos, sino en su capacidad para mitigar la ambigüedad espectral en un entorno de alta nubosidad y fragmentación antrópica, validando la importancia de contrastar los resultados obtenidos, con los resultados de los metadatos de referencia como ESA WorldCover ([Zanaga et al., 2021](#)) e [INVEMAR \(2023\)](#) para asegurar la fidelidad cartográfica. Este resultado señala la necesidad de integrar criterios estadísticos y espaciales en la evaluación de índices espectrales, evitando interpretaciones basadas exclusivamente en métricas globales de precisión.

Las limitaciones de los IV evaluados están relacionadas a su sensibilidad ante factores atmosféricos y estructurales del ecosistema ([Tran et al., 2022](#)). En Tumaco, la persistente nubosidad y la alta humedad relativa actúan como filtros que atenúan la reflectancia, mientras que la dinámica mareal modifica la firma del infrarrojo al exponer o sumergir el sustrato húmedo ([Velásquez & Pérez, 2024](#)) haciendo que los productos ópticos pasivos como Sentinel-2, puedan presentar inconsistencias en la delimitación de manglares ralos o bajo pleamar. El presente estudio demuestra que los índices especializados mejoran la discriminación espectral, pero, la dependencia de un único sensor óptico constituye una limitación para el monitoreo multitemporal en el Pacífico colombiano. Por lo tanto, se recomienda en futuras investigaciones frente a la caracterización cartográfica de manglares en el Pacífico colombiano, implementar el uso de metodologías más robustas que integren sensores activos de Radar (SAR), los cuales, al poseer capacidad de penetración en el dosel, permiten mitigar la incertidumbre generada por las mareas y el vapor de agua ([Ghorbanian et al., 2021](#)).

CONCLUSIONES

La precisión de los IV para manglares en San Andrés de Tumaco depende del equilibrio entre precisión estadística y coherencia espacial. El CMRI destacó por su alta precisión, mientras que el MI mostró mejores resultados visuales, menor dispersión y sobreestimación de áreas. Esta dualidad evidencia que, para las particularidades del Pacífico colombiano en entornos complejos, es clave evaluar simultáneamente métricas estadísticas, representación espacial y consistencia en la estimación de áreas. Los resultados indican que los índices especializados reducen la incertidumbre frente a los tradicionales; sin embargo, sus umbrales son de validez local y temporal, por lo que requieren ajustes radiométricos estacionales, especialmente en condiciones de marea para evitar sobreestimaciones. Asimismo, la alta variabilidad de índices como el MVI demuestra que una mayor complejidad no implica mejor desempeño en contextos heterogéneos. Se recomienda integrar datos multiespectrales y sensores activos (Radar) para superar limitaciones como la nubosidad y mejorar el monitoreo operativo y la toma de decisiones ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los grupos PROECUT y GIBDET de la Universidad del Tolima, así como a la vicerrectoría de investigación, por el apoyo brindado mediante la convocatoria nº 08-2023 (cp 100224), destinada a financiar trabajos de grado de estudiantes vinculados a grupos de investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

N.E.J.T.: conceptualización, investigación, metodología, análisis formal, validación, redacción, revisión y edición, preparación del borrador original. M.A.P.A.: supervisión, conceptualización, metodología, redacción. M.A.Q.C.: supervisión, conceptualización, redacción, revisión. M.A.S.M.: supervisión, conceptualización, redacción, revisión. Todos los autores contribuyeron al documento y comentaron los borradores.

DECLARACIÓN DE USO DE IA

Los autores declaran que no se han utilizado herramientas, modelos o sistemas de inteligencia artificial

REFERENCIAS

- Alongi, D. M.** (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- Baloloy, A. B., Blanco, A. C., Sta. Ana, R. R. C., & Nadaoka, K.** (2020). Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 95–117.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.001>
- Bunting, P., Rosenqvist, A., Lucas, R. M., Rebelo, L. -M., Hilarides, L., Thomas, N., Hardy, A., Itoh, T., Shimada, M., & Finlayson, C. M.** (2018). The Global Mangrove Watch — A New 2010 Global Baseline of Mangrove Extent. *Remote Sensing*, 10(10), 1669.
<https://doi.org/10.3390/rs10101669>

- Cohen, J.** (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46.
<https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Congalton, R. G.** (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Congalton, R. G., & Green, K.** (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (3.rd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9780429052729>
- Diniz, C., Cortinhas, L., Nerino, G., Rodrigues, J., Sadeck, L., Adami, M., & Souza-Filho, P. W. M.** (2019). Brazilian mangrove status: Three decades of satellite data analysis. *Remote Sensing*, 11(7), 808.
<https://doi.org/10.3390/rs11070808>
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N.** (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), 961–968.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Fauzi, A. I., Immitzer, M., & Atzberger, C.** (2025). Exploring new mangrove horizons: A scalable remote sensing approach with Planet-NICFI and Sentinel-2 images. *Ecological Informatics*, 88, 103152.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103152>
- Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G., & Milton, E. J.** (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 83-92.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>
- Ghorbanian, A., Zaghian, S., Asiyabi, R. M., Amani, M., Mohammadzadeh, A., & Jamali, S.** (2021). Mangrove ecosystem mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images and Random Forest algorithm in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13 (13), 2565.
<https://doi.org/10.3390/rs13132565>
- Gómez Torres, J. E. y Peñaranda Cabarcas, J. E.** (2012). Descripción del comportamiento de variables atmosféricas y oleaje en el puerto de Tumaco a partir de observación de datos. *Boletín Científico CIOH*, 30, 75–92.
<https://doi.org/10.26640/22159045.244>
- Gupta, K., Mukhopadhyay, A., Giri, S., Chanda, A., Majumdar, S. D., Samanta, S., Mitra, D., Samal, R. N., Pattnaik, A. K., & Hazra, S.** (2018). An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery. *MethodsX*, 5, 1129–1139.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.09.011>

- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.** (2023). *MANGLARES COLOMBIA* [Conjunto de datos]. ArcGIS Hub. <https://acceso-datos-ambientales-invemar.hub.arcgis.com/datasets/INVEMAR::manglares-colombia/about>
- Klinger, W., Valoyes, Z., Sosa, C., Díaz, C. y Ramirez, G.** (2012). Valoración integral del ecosistema de manglar en el municipio de San Andrés de Tumaco (Nariño). Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico.
- Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc, T. V., & Dech, S.** (2011). Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, 3(5), 878-928. <https://doi.org/10.3390/rs3050878>
- Lamprecht, H.** (1990). *Silvicultura en los Trópicos: Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas - posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. https://www.academia.edu/89966516/Silvicultura_en_Los_Tropicos_Lamprecht
- Landis, J. R., & Koch, G. G.** (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Melo Wilches, L. H., & Camacho Chávez, M. A.** (2005). *Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Perea-Ardila, M. A., Leal-Villamil, J., & Oviedo-Barrero, F.** (2021). Spectral characterization and monitoring of mangrove forests with remote sensing in the Colombian Pacific Coast: Bajo Baudó, Chocó. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 34(2), 27-44. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.02>
- Perea-Ardila, M. A. y Murillo-Sandoval, P. J.** (2024). Comparación de índices de vegetación basados en imágenes satelitales para la identificación de bosques de manglar en Colombia. *Madera y Bosques*, 30(4), 1-18. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3042600>
- Rodríguez-Rodríguez, J. A. (Ed.).** (2022). *La restauración de los manglares en Colombia: Técnicas, saberes y experiencias* (Serie Publicaciones Generales No. 123). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. <https://n2t.net/ark:/81239/m9jx3r>
- Ruiz-Roldán, J. J., Blanco-Libreros, J. F., & López-Rodríguez, S. R.** (2023). Mapeo de manglares utilizando cómputo en la nube y un índice espectral específico para apoyar acciones de manejo: un caso del Caribe Colombiano semiárido. *Ecosistemas*, 32(3), 2599. <https://doi.org/10.7818/ecos.2599>
- Shi, T., Liu, J., Hu, Z., Liu, H., Wang, J., & Wu, G.** (2016). New spectral metrics for mangrove forest identification. *Remote Sensing Letters*, 7(9), 885-894. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1195935>

- Simonetti, D., Pimple, U., Langner, A. & Marelli, A.** (2021). Pan-tropical Sentinel-2 cloud-free annual composite datasets. *Data in Brief*, 39, 107488.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107488>
- Tavera-Escobar, H. A.** (2010). *Caracterización, diagnóstico y zonificación de los manglares en el departamento de Nariño: Documento síntesis*. Corporación Autónoma Regional de Nariño; WWF Colombia; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/caracterizacion_manglares_final_web.pdf
- Tran, T. V., Reef, R., & Zhu, X.** (2022). A review of spectral indices for mangrove remote sensing. *Remote Sensing*, 14, (19), 4868.
<https://doi.org/10.3390/rs14194868>
- Valoyes Cardozo, Z., Moreno Díaz, C. y Sosa Botero, C.** (2014). Valoración integral del bosque de manglar en el municipio de San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia. *Revista Bioetnia*, 11(1), 25–36.
<https://doi.org/10.51641/bioetnia.v11i1.136>
- Velásquez Franco, P. A. y 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), 161-178.
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.105225>
- Wang, D., Wan, B., Qiu, P., Su, Y., Guo, Q., Wang, R., Sun, F., & Wu, X.** (2018). Evaluating the performance of Sentinel-2, Landsat 8 and Pléiades-1 in mapping mangrove extent and species. *Remote Sensing*, 10(9), 1468.
<https://doi.org/10.3390/rs10091468>
- Wang, L., Jia, M., Yin, D. & Tian, J.** (2019). A review of remote sensing for mangrove forests: 1956–2018. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111223.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111223>
- Wilkie, M. L., & Fortuna, S.** (2003). *Status and Trends in Mangrove Area Extent Worldwide* (Working Paper FRA 63) Forestry Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
<https://www.fao.org/4/j1533e/j1533e00.htm>
- Winarso, G., & Purwanto, A. D.** (2014). Evaluation of mangrove damage level based on Landsat 8 image. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 11(2), 105–116.
<https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2014.v11.a2608>
- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, L., Tsendbazar, N. -E., ... Arino, O.** (2021). *ESA WorldCover 10m 2020 v100* (Versión v100) [Conjunto de datos]. Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>

