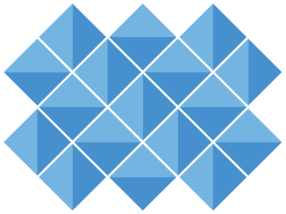


MAPBIOMAS
COLOMBIA



MAPBIOMAS
[AGUA]

Documento de base teórica sobre algoritmos (ATBD)

Apéndice - Agua

MapBiomas Agua - Colombia

Colección 4, Versión 1

2026

Coordinación del proyecto

Adriana Rojas Suárez
Karen Andrea Huertas

Responsable técnico

John Aguilar

Desarrollo

Emanuel Valero

Equipo de especialistas

Catalina Pacheco
Nicolle Melo
Camila García

Institución

Fundación Gaia Amazonas

Gaia
Amazonas

Calle 70a # 11- 30
Bogotá, Colombia.
(57-1) 772 35 42 / (57-1) 805 37 68
contacto@gaiaamazonas.org
https://www.gaiaamazonas.org

Cómo citar:
MapBiomas Colombia. (2026). MapBiomas Agua: Colección 4.0 de la Serie Anual y Mensual de Mapas de Superficie de Agua de Colombia (1985-2025). Fundación Gaia Amazonas. https://plataforma.colombia.mapbiomas.org

Índice

1. Introducción..... 6
1.1. Importancia del monitoreo del agua superficial en Colombia.....6
1.2. Objetivo y alcance.....6
1.3. Usuarios y usos previstos..... 7
2. Antecedentes.....8
2.1. Origen y expansión de MapBiomas Agua.....8
2.2. Productos existentes y vacíos.....9
2.3 Evolución metodológica y conceptual de las colecciones de MapBiomas Agua Colombia (Colecciones 1 a 4).....10
2.3.1. Colección 1..... 10
2.3.2. Colección 2..... 14
2.3.3. Colección 3..... 16
2.3.3. Colección 4..... 16
3. Área de estudio y regionalización..... 17
3.1. Área de estudio..... 17
3.2. Retos para la detección de agua en Colombia..... 19
4. Datos..... 20
4.1. Imágenes Landsat.....20
4.2. Calidad de los mosaicos anuales.....20
4.3. Datos auxiliares.....22
5 Metodología..... 22
5.1. Flujo general.....22
5.2. Regionalización..... 24
5.3. Análisis de mezcla espectral.....24
5.4. Clasificación supervisada.....26
5.4.1. Muestreo..... 26
5.4.2. Entrenamiento y clasificación.....26
5.5. Post-clasificación.....28
5.5.1. Enmascaramiento con índices espectrales.....28
5.5.2. Llenado temporal de meses sin información.....30
5.5.3. Filtro de frecuencia.....31
5.5.4. Limpieza con capas de referencia.....31
5.6. Producto mensual..... 32
5.7. Producto anual: agua permanente y temporal..... 33
5.7.1. Justificación del umbral..... 33
5.8. Clasificación por tipo de uso..... 36
5.9. Leyenda.....37
5.9.1. Agua natural..... 39
5.9.2. Agua antrópica..... 41

6. Calidad del dato..... 45
6.1. Estado de la evaluación de exactitud.....45
6.2. Controles de calidad de esta versión..... 45
6.3. Plan de evaluación 2027.....45
7. Productos y análisis derivados..... 45
7.1. Superficie de agua..... 45
7.2. Transiciones de superficie de agua.....46
7.3. Tendencia de superficie de agua.....48
7.3.1. Modelo armónico.....48
7.3.2. Diferencias entre el modelo y los datos observados.....49
7.3.3. Prueba estacional de Mann-Kendall..... 50
8. Limitaciones y recomendaciones de uso..... 53
9. Perspectivas..... 54
10. Referencias..... 55

Índice de figuras

Figura 1. Países amazónicos..... 10
Figura 5. Regionalización de Colombia en la Colección 2..... 16
Figura 6. Áreas hidrográficas de Colombia..... 19
Figura 7. Biomas de Colombia..... 20
Figura 8. Regiones de Colombia..... 21
Figura 9. Flujo de clasificación..... 25
Figura 11. Generación de muestras..... 28
Fuente: elaboración propia..... 28
Figura 12. Proceso de clasificación..... 29
Fuente: elaboración propia..... 29
Figura 13. Funcionamiento del enmascaramiento para cada índice..... 30
Figura 14. Funcionamiento del enmascaramiento para cada índice..... 32
Figura 15. Funcionamiento del filtro de frecuencia..... 33
Figura 16. Limpieza con capas de referencia..... 33
Figura 17. Ejemplo de mapeo mensual de agua superficial (12 meses)..... 35
Figura 18. Superficie de agua permanente y temporal en 2025..... 37
Figura 19. Metodología de clasificación por tipo de uso..... 38
Figura 20. Ejemplo de las categorías de tipo de uso..... 40
Figura 21. Clase Ríos..... 42
Figura 22. Clase Lagos y lagunas..... 43
Figura 23. Clase Ciénagas y zonas pantanosas..... 43
Figura 24. Clase Embalses..... 44
Figura 25. Clase Agua asociada a minería..... 45
Figura 26. Clase Estanques acuícolas..... 46
Figura 27. Clase Uso antrópico..... 47
Figura 28. Ejemplo de visualización de los datos de la capa de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomas Agua..... 50
Fuente: elaboración propia..... 50
Figura 29. Dinámica de superficie de agua RGB. El color azul indica persistencia, ya que el total de años fueron clasificados como superficie de agua; verde, incrementó (los años desde el principio de la serie temporal hasta la primera clasificación); y rojo disminución. Los colores negros y oscuros indican superficies de agua esporádicas o no permanentes. Fuente: MapBiomas Agua (2023)..... 51
Figura 30. Ejemplo de transición de superficie de agua en Puerto Wilches, Santander (Magdalena Medio). Se ilustra una transición específica en la región, utilizando la composición de color previamente descrita.
Fuente: MapBiomas Agua (2023)..... 52
Figura 31. Ejemplo de ajuste de serie armónica a los resultados de superficie de agua mapeada mensualmente. La línea azul corresponde a la superficie de agua mapeada, la línea roja indica el ajuste del modelo armónico..... 53
Fuente: MapBiomas Agua (2023)..... 53

Figura 32. Ejemplo de las diferencias entre el modelo ajustado y los datos observados. Los puntos y barras verdes indican valores de aumento, mientras que los puntos y barras rojas indican valores de disminución en relación a lo esperado por el modelo armónico. Fuente: MapBiomas Agua (2023)..... 54

Índice de tablas

Tabla 1. Evolución de colecciones de MapBiomas Agua..... 11
Tabla 2. Distribución del área clasificada por clase de calidad del mosaico, por periodo (% del área clasificada)..... 22
Tabla 3. Datos auxiliares usados en el método..... 24
Tabla 4. Valores de la librería de endmembers..... 27
Tabla 5. Parámetros de la clasificación..... 29
Tabla 6. Índices usados en el enmascaramiento..... 31
Tabla 7. Leyenda nivel 1 y nivel 2 de naturalidad para la Colección 4.0 de MapBiomas Agua..... 41

1. Introducción

1.1. Importancia del monitoreo del agua superficial en Colombia

Colombia es un país anfibio. Sus aguas superficiales drenan hacia cinco grandes áreas hidrográficas (Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico), cada una con regímenes de lluvia, relieve y presiones de uso distintos (IDEAM, 2023). Los humedales continentales ocupan más de 30 millones de hectáreas, cerca del 26 % del territorio continental, y la mayor parte de esa extensión corresponde a humedales temporales (Flórez et al., 2016).

Esa riqueza hídrica no es estática. La extensión de ríos, ciénagas, lagunas y planicies inundables cambia de un mes a otro con los pulsos de lluvia y, entre años, con la variabilidad climática asociada a El Niño y La Niña. Los extremos tienen costos altos para el país: las pérdidas de la temporada invernal de 2010-2011, asociada a La Niña, se estimaron en 11,2 billones de pesos, alrededor del 2 % del PIB (CEPAL & BID, 2012). A la variabilidad natural se suman transformaciones humanas como la expansión agropecuaria, la minería, la construcción de embalses y la adecuación de tierras, que crean, modifican o eliminan cuerpos de agua. Además, la demanda hídrica se concentra en las regiones donde hay menos agua disponible (IDEAM, 2023).

Gestionar este sistema requiere saber dónde hay agua en superficie, cuándo está presente y cómo ha cambiado en el tiempo. Colombia cuenta con referentes nacionales valiosos, como el Estudio Nacional del Agua del IDEAM y el mapa de humedales del Instituto Humboldt. Sin embargo, no disponía de una serie histórica continua, mensual y anual, con resolución espacial detallada y de acceso abierto, que permitiera seguir la dinámica del agua superficial en todo el territorio continental. Los productos globales disponibles tampoco capturan bien algunas condiciones propias del país, como la turbidez de los ríos andinos, las sabanas inundables y la sombra topográfica.

MapBiomas Agua Colombia responde a ese vacío con mapas de superficie de agua desde 1985 hasta 2025, a 30 m de resolución, que diferencian el agua natural de la modificada por actividades humanas. Producir esta información implica procesar el archivo completo de imágenes Landsat sobre el país en Google Earth Engine y adaptar un método desarrollado en Brasil a las condiciones colombianas. También implica sostener un trabajo colaborativo entre instituciones y actualizar la serie con cada nueva colección. El resultado es un bien público: datos abiertos y comparables en el tiempo, que sirven de base común a instituciones, territorios e investigadores.

1.2. Objetivo y alcance

El objetivo de MapBiomas Agua Colombia es mapear la dinámica del agua superficial en el territorio continental colombiano, de forma mensual y anual, entre 1985 y 2025. Este Documento de Base Teórica de Algoritmos (ATBD) describe los datos, el método y los

productos de la Colección 4. Su fin es que los usuarios entiendan cómo se generan los mapas, sepan cómo interpretarlos y conozcan sus limitaciones.

La Colección 4 incluye:

- Mapas mensuales de presencia de agua superficial.
- Mapas anuales de frecuencia, con la distinción entre agua permanente y temporal
- Una clasificación del agua por grado de naturalidad
    - Agua natural: ríos; lagos y lagunas; ciénagas y zonas pantanosas,
    - Agua antrópica: desagregadas según su actividad o infraestructura asociada: embalses, agua asociada a minería, estanques para uso acuícola y uso antrópico.
- Capas derivadas de transiciones y tendencias, consultables en la plataforma de MapBiomas.

Quedan fuera de este documento los glaciares, la profundidad y el volumen de agua y su calidad. También quedan fuera el agua cubierta por dosel forestal o por vegetación flotante densa, que los sensores ópticos no detectan de forma confiable, y los cuerpos de agua menores que la resolución de 30 m. La evaluación de la exactitud temática de la Colección 4 está prevista para 2027.

1.3. Usuarios y usos previstos

Los datos están pensados para entidades públicas, autoridades ambientales, organizaciones y autoridades indígenas y étnicas, academia, sector privado y sociedad civil. Entre los usos previstos están:

- Planificación y ordenamiento territorial: insumo para planes de ordenación de cuencas (POMCA) y de ordenamiento territorial, en especial para identificar áreas que se inundan de forma recurrente.
- Gestión del riesgo: apoyo a la identificación de zonas expuestas a inundaciones y al seguimiento de temporadas secas y húmedas.
- Conservación de ecosistemas acuáticos: seguimiento de humedales, ciénagas y planicies inundables, incluidos los sitios de importancia internacional.
- Seguimiento ambiental: observación de la aparición y evolución de embalses, cuerpos de agua asociados a minería y estanques acuícolas.
- Gestión territorial indígena y étnica: consulta de la dinámica del agua en resguardos, territorios colectivos y áreas protegidas, como apoyo a sus propios procesos de gobernanza.
- Investigación: base para estudios sobre hidrología, variabilidad climática, cambio de uso del suelo y ecología de agua dulce.

Los datos se pueden consultar por unidades territoriales (bioma, cuenca, departamento, municipio, área protegida y territorio indígena) y descargar libremente desde la plataforma de MapBiomas Colombia.

2. Antecedentes

2.1. Origen y expansión de MapBiomas Agua

La base metodológica de MapBiomas Agua proviene del estudio de Imazon y WWF-Brasil en el bioma amazónico brasileño, extendido luego a la cuenca del Alto Paraguay (Souza et al., 2019). Ese trabajo mostró el potencial de la teledetección para seguir los cambios de la superficie de agua en el tiempo y dio origen a MapBiomas Agua en Brasil.

En la Panamazonía, la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG) creó MapBiomas Amazonía en 2017 para mapear los cambios de cobertura y uso del suelo. En 2022, la alianza entre MapBiomas y la RAISG inició la adaptación del método de agua a los países amazónicos (Figura 1). En septiembre de 2023 se lanzó la primera colección de mapas de agua superficial de la Panamazonía, de la que surgieron los capítulos nacionales.

MapBiomas Colombia es una iniciativa colaborativa y multiinstitucional liderada por la Fundación Gaia Amazonas, en alianza con la red MapBiomas, la RAISG e instituciones académicas y científicas. Genera información histórica, anual y abierta sobre la cobertura y el uso del suelo del territorio continental colombiano, y reúne líneas temáticas de Cobertura y Uso del Suelo, Fuego, Alerta y Agua. MapBiomas Agua Colombia es la línea dedicada a la dinámica del agua superficial.



Figura 1. Países amazónicos.
Fuente: elaboración propia adaptado de RAISG (2025).

2.2. Productos existentes y vacíos

El acceso libre al archivo Landsat y el procesamiento en la nube permitieron producir conjuntos globales de agua superficial de varias décadas. El más usado es Global Surface Water (Donchyts et al., 2016; Pekel et al., 2016), que analiza más de 30 años de imágenes Landsat a nivel de píxel. Su uso directo a escala nacional tiene limitaciones para detectar agua en llanuras de inundación, humedales tropicales y cuerpos de agua pequeños.

Para superar esas restricciones, la red MapBiomas desarrolló en el bioma amazónico brasileño un método basado en el análisis de mezcla espectral (SMA) y árboles de decisión empíricos con lógica difusa (Souza et al., 2019). MapBiomas Agua Colombia lo adoptó en sus colecciones 1 y 2. En las colecciones 3 y 4 lo reemplazó por una clasificación supervisada con *Random Forest*, que permite incorporar la turbidez de los ríos andinos, la dinámica de las sabanas inundables y la sombra topográfica propia del país.

2.3 Evolución metodológica y conceptual de las colecciones de MapBiomas Agua Colombia (Colecciones 1 a 4)

El desarrollo de MapBiomas Agua Colombia ha estado marcado por un proceso iterativo de mejora continua, orientado a capturar con mayor precisión la complejidad hidroclimática y topográfica del territorio nacional. A lo largo de sus cuatro colecciones, la iniciativa ha evolucionado tanto en la cobertura temporal y espacial de sus análisis como en el robustecimiento de sus algoritmos de clasificación y en la desagregación temática de los cuerpos de agua. En la Tabla 1 se sintetizan los principales parámetros que marcan esta evolución metodológica, los cuales se detallan colección por colección a continuación.

	Colección			
	1	2	3	4
Serie	2000-2022	1998-2023	1998-2024	1985-2025
Regiones	32	25	133	133
Sensor	Landsat 5,7,8	Landsat 5,7,8	Landsat 5,7,8,9	Landsat 5,7,8,9
Variables	6	6	12	12
Método	SMA+lógica difusa	SMA+lógica difusa	SMA+*Random Forest*	SMA+*Random Forest*

Tabla 1. Evolución de colecciones de MapBiomas Agua
Fuente: elaboración propia

2.3.1. Colección 1

La primera colección sentó las bases para mapear la dinámica mensual y anual del agua superficial de la Panamazonía (2000-2022) utilizando imágenes Landsat 5 (TM), 7 (ETM+) y 8 (OLI) a 30 metros, filtrando escenas con menos de 70& de nubosidad en Google Earth Engine.

Para responder a la heterogeneidad geográfica del país, Colombia se dividió inicialmente en 6 grandes regiones de clasificación, derivados a partir de los biomas definidos en la primera colección de MapBiomas Colombia en donde se encuentra la presencia de Amazonía,

Orinoquía, Andes, Andes Norte, Pacífico y Caribe. Finalmente, se adoptó la regionalización por 32 cartas como se muestra en la **Figura 2.**

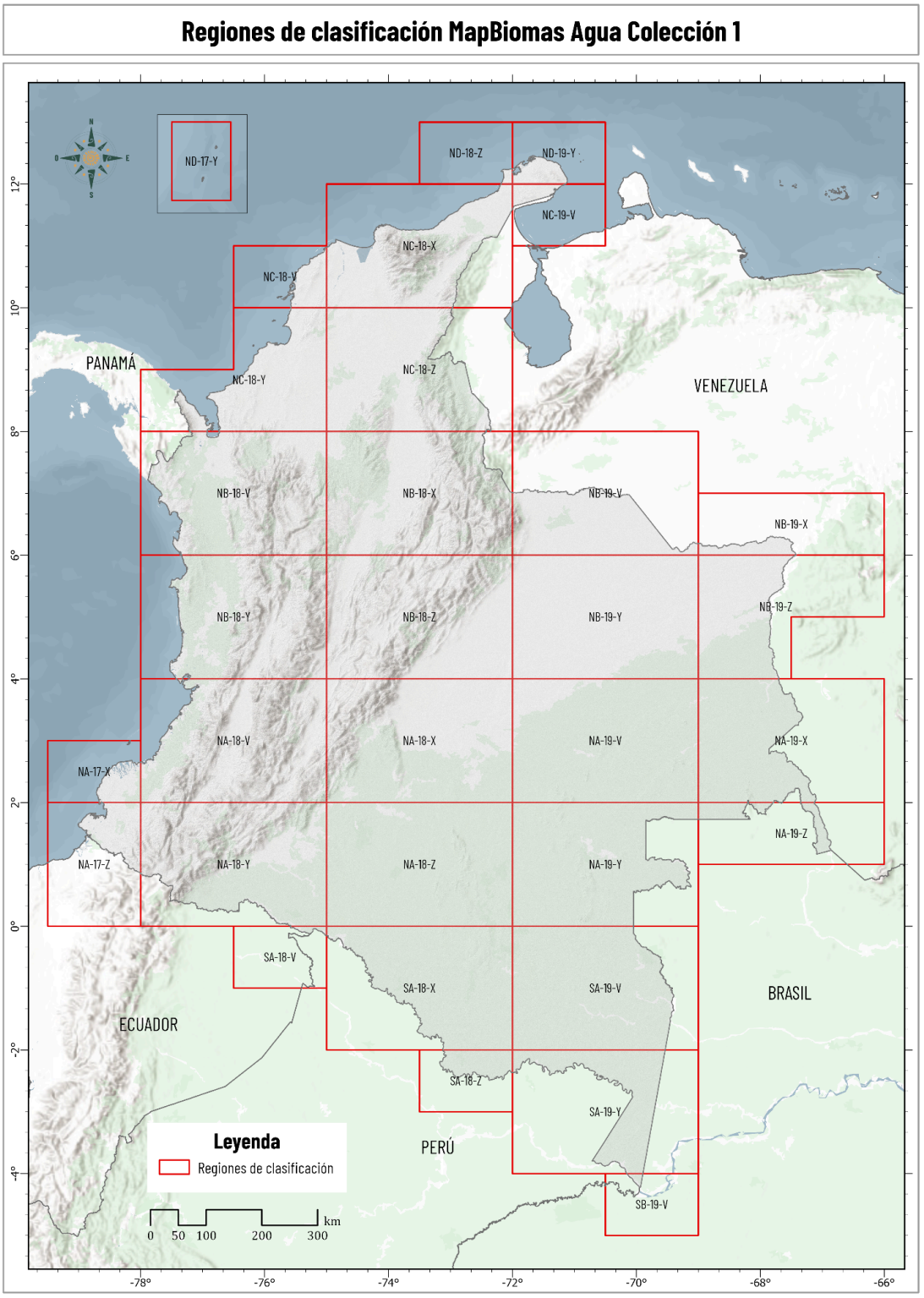


Figura 2: Regiones de clasificación MapBiomas Agua Colección 1.
Fuente: elaboración propia.

Sobre cada escena mensual se aplicó un Análisis de Mezcla Espectral (SMA) para desagregar el píxel en fracciones de componentes puros (endmembers):

En tierras bajas/Amazonía se emplearon 4 endmembers: vegetación verde (GV), suelo (Soil), vegetación no fotosintética (NPV) y nubes (Cloud), calculando la sombra (Shade) fotométrica por sustracción. Mientras que en Andes, y Pacífico se utilizaron 6 endmembers directos, incorporando nieve (Snow) y sombra (Shade).

El algoritmo SWSC parte de la premisa física de que el agua absorbe fuertemente la radiación electromagnética (alta fracción de $Shade > 65%). Sin embargo, para capturar agua mezclada con vegetación o suelo en humedales, bordes y ríos estrechos (GV + Soil <10%), así como agua con alta carga de sedimentos (Cloud < 25%), se abandonaron los cortes binarios rígidos y se implementaron reglas de transición mediante funciones lineales difusas (fuzzy logic) ver Figura 3. Estas reglas generan un mapa continuo de certeza (membership) entre 0 y 1 para cada mes.

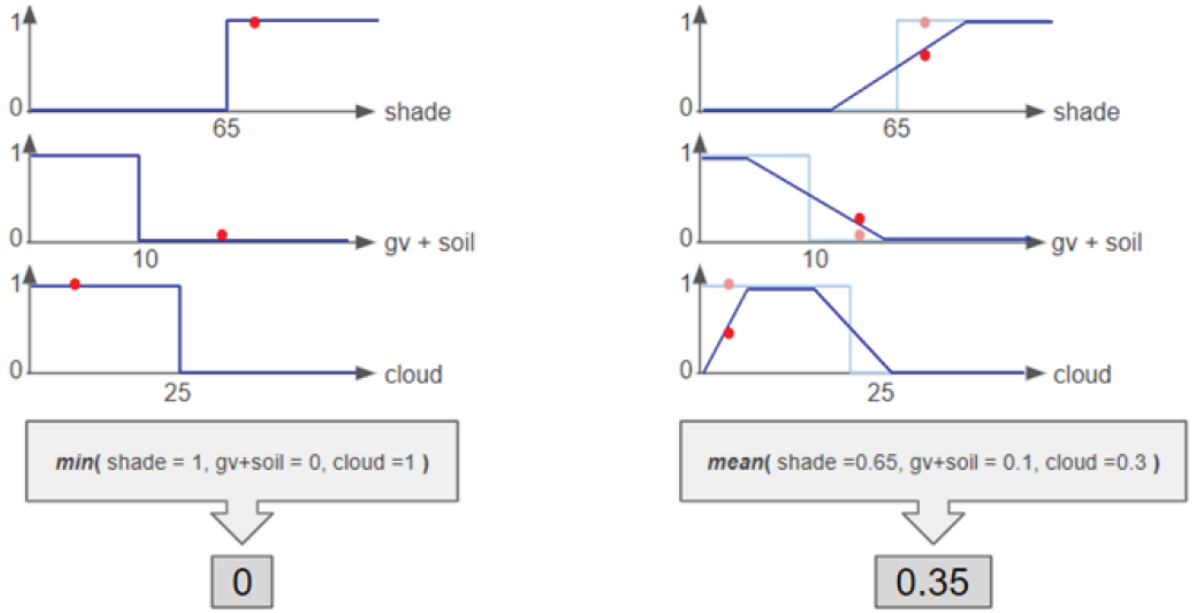


Figura 3: Reglas binarias del clasificador subpíxel de agua superficial.
El esquema de la izquierda muestra un ejemplo de agua superficial no detectada para un píxel con valores de fracción indicados por los puntos rojos (el valor de gv + soil está por encima del umbral > 10 para ser clasificado como agua). El ejemplo de la derecha aplica una lógica fuzzy lineal a la variable y el valor medio permite clasificar correctamente el píxel (punto rojo) como agua superficial. Fuente: Souza et al., (2019).

Como sintetiza el diagrama metodológico de la Figura 4, el membership mensual pasa por un árbol de decisión:

1. Se clasifican los píxeles con una pertenencia (membership) mayor a 0.5–0.8, dependiendo de la región. Para facilitar la detección de ríos estrechos, el umbral se reduce a > 0.4–0.6 en áreas de baja pendiente estratificada (slppost).
2. Para recuperar píxeles cubiertos por nubes, se reclasifican como agua aquellos cuya mediana intra-anual y mediana decenal del mes superen el umbral de 0.3–0.67.
3. Se eliminan falsos positivos por sombras oscuras cuando el membership mensual mediano es <0.35.

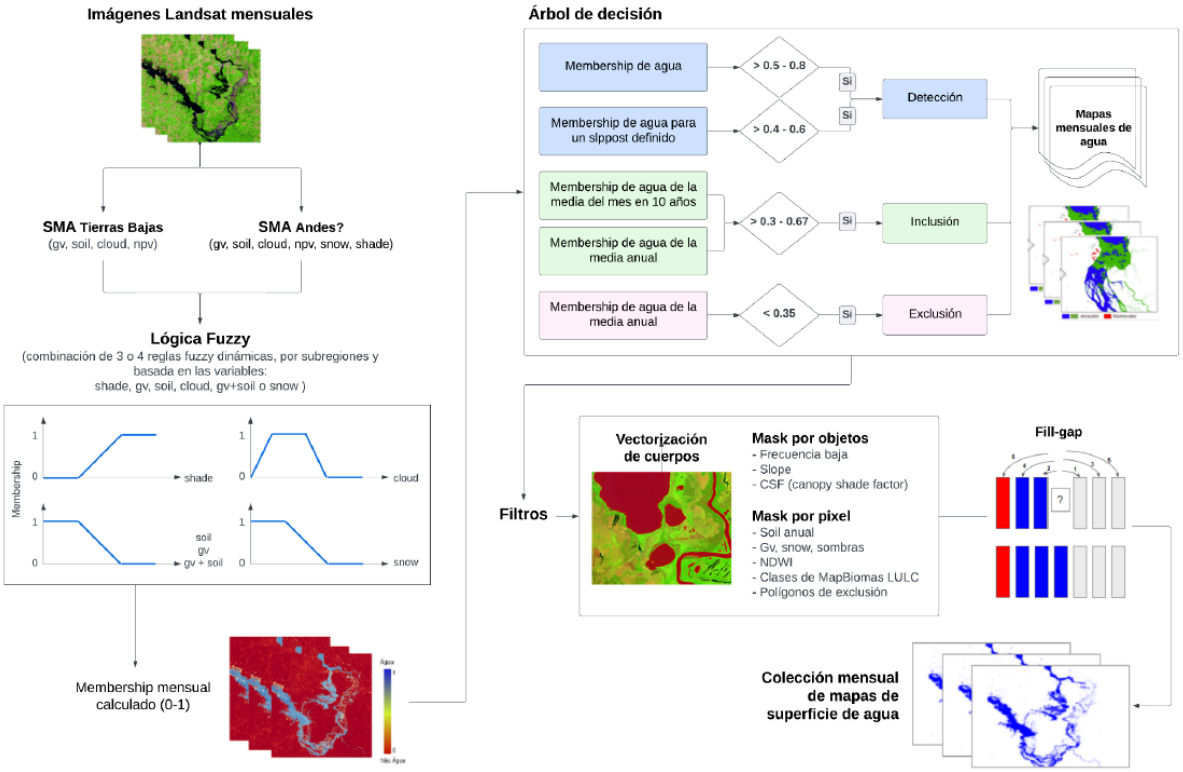


Figura 4: Proceso metodológico para producir los datos de superficie de agua colección 1.
Fuente: MapBiomas Amazonía, 2023

Posteriormente, se aplican filtros por objetos (vectorización para remover baja frecuencia, pendiente y sombra de dosel) y por píxel (máscaras de suelo anual, nieve, clases de MapBiomas LULC y polígonos de exclusión). Finalmente, los mapas mensuales se integran en mapas anuales diferenciando agua permanente (frecuencia >7 meses) y agua temporal (1-6 meses), además de generar las capas de transiciones RGB y tendencias temporales mediante modelos armónicos y la prueba estacional de Mann-Kendall. En esta primera colección no existía aún la categorización de tipo de uso origen natural o antrópico.

2.3.2. Colección 2

La Colección 2 mantuvo el análisis del SMA y el clasificador subpíxel SWSC con lógica difusa sobre imágenes Landsat 5, 7 y 8), pero introdujo ajustes críticos para mejorar la precisión espacial. En esta versión, Colombia pasó de 6 macro-regiones a 25 regiones de clasificación específicas (Figura 4), permitiendo calibrar con mayor detalle los umbrales de membership frente a las variaciones regionales y mitigar las caídas de detección asociadas al cambio de sensor entre Landsat 7 y Landsat 8.

Se delimitaron tres regiones de clasificación para los biomas diferentes a Andes y Andes Norte, de acuerdo a sus comportamientos similares y poca variación altitudinal. La primera categoría se denomina "zonas bajas", abarcando la región amazónica y la parte septentrional del bioma Caribe, excluyendo la Sierra Nevada de Santa Marta. La segunda categoría es "zonas inundables", que cuenta con los biomas de la Orinoquía, el complejo cenagoso al sur del bioma Caribe y los valles interandinos del Magdalena y Cauca. Asimismo, la región del Pacífico se delimita conforme al bioma establecido en MapBiomas Cobertura y Uso.

En el caso de Andes y Andes Norte, se crearon tres regiones distintas: Andes altos, Andes intermedios y Andes bajos. La primera región abarca las áreas situadas a altitudes iguales o superiores a 3.500 msnm. La segunda, zonas con altitudes entre 1.500 y 3.500 msnm. Por último, la tercera región incluye las áreas a altitudes inferiores a 1.500 hasta los 500 msnm. Las regiones de clasificación se pueden ver en la Figura 5.

En el paso de enmascaramiento, el uso del índice CSF (Canopy Shade Factor) fue fundamental para eliminar falsos positivos en píxeles con mezcla espectral. Este índice cuantifica en un rango normalizado de 0 a 1 la sombra proyectada por la vegetación, cuya respuesta espectral suele confundirse con el agua; a mayor valor de CSF, mayor es el nivel de restricción aplicado. En el flujo de trabajo (mediante la variable csf_year), los umbrales de filtrado se ajustan de forma manual según el entorno: por ejemplo, en una laguna de páramo con baja cobertura arbórea y escasa sombra (CSF ≈ 0,1), el espejo de agua se conserva fácilmente, mientras que en humedales rodeados de vegetación alta (CSF ≈ 0,8), el algoritmo filtra esos píxeles para evitar clasificar sombra densa como agua

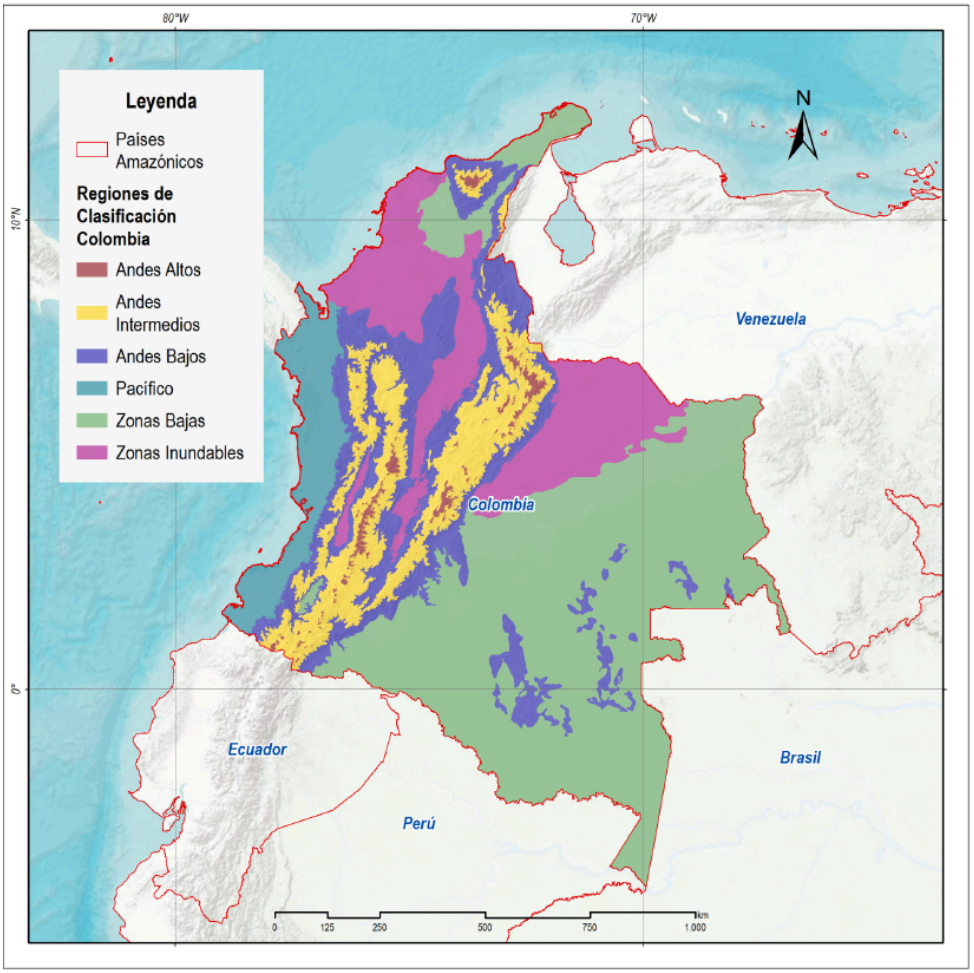


Figura 5. Regionalización de Colombia en la Colección 2.
Fuente: elaboración propia.

Uno de los principales avances metodológicos de la Colección 2 fue la incorporación de una clasificación anual de los cuerpos de agua según su origen y características, mediante seis categorías: 1) Natural, 2) Antrópico, 3) Hidroeléctricas, 4) Agua de minería, 5) Acuicultura y 6) Falsos positivos. Esta última se utilizó como una categoría de depuración para identificar y excluir detecciones que no correspondían a superficies de agua reales.

Para realizar esta clasificación se implementó un procedimiento de cuatro etapas:

1. Los rásteres anuales de frecuencia mensual se segmentan en polígonos mediante el algoritmo SNIC (Simple Non-Iterative Clustering), implementado en Google Earth Engine (Figura 8, ATBD Col. 2).
2. A cada polígono se le asignaron variables morfométricas y geomorfológicas, entre ellas área, perímetro, compacidad, redondez, elongación, relación largo-ancho, convexidad y número de vecinos dentro de un buffer de 50 m. También se incorporaron datos de elevación máxima del modelo SRTM, frecuencia hídrica media y capas auxiliares de referencia, como la clasificación de la ANLA y las coberturas de MapBiomas.

3. Se aplicó el algoritmo *Random Forest*, entrenado con muestras recolectadas por bioma a partir de grillas de referencia, para asignar a cada objeto una de las categorías establecidas.
4. Finalmente, se aplicaron reglas de consistencia temporal para evitar cambios injustificados entre categorías de un año a otro.

2.3.3. Colección 3

La Colección 3 introdujo cambios en el procedimiento de detección del agua superficial en Colombia, para el periodo 1998–2024. La principal modificación consistió en reemplazar las reglas empíricas basadas en lógica difusa del SWSC por un esquema de clasificación supervisada mediante el algoritmo *Random Forest*, aplicado a nivel de píxel. Este cambio permitió fortalecer el proceso de identificación de superficies de agua y adaptar los modelos a las diferentes condiciones ambientales del territorio nacional.

Se incorporaron imágenes del satélite Landsat 9 (OLI-2), junto con las provenientes de Landsat 5, 7 y 8. Esto permitió ampliar la disponibilidad de observaciones y mejorar la frecuencia de adquisición de imágenes para el seguimiento de las superficies de agua.

El territorio colombiano, continental e insular, se dividió en 133 regiones de trabajo de 100 × 100 km². Esta organización permitió desarrollar procesos de entrenamiento y clasificación ajustados a las condiciones particulares de cada zona, considerando las diferencias ambientales y espectrales presentes en el país, como la turbidez de las aguas andinas, las dinámicas de inundación de las sábanas y las sombras asociadas al relieve.

Para el entrenamiento de los modelos se utilizaron los resultados depurados de la Colección 2 como referencia, a partir de los cuales se construyó un muestreo estratificado de puntos correspondientes a las clases agua y no agua. Los modelos Random Forest incorporaron las fracciones obtenidas mediante el Análisis de Mezcla Espectral (SMA) y un conjunto ampliado de 15 variables predictoras y de enmascaramiento.

Posteriormente, se fortalecieron los procedimientos de postclasificación mediante filtros espectrales y topográficos orientados a reducir los errores de comisión y mejorar la calidad de las detecciones. Por su parte, la clasificación temática anual mantuvo el análisis orientado a objetos mediante SNIC y el esquema de categorización por naturalidad heredado de la Colección 2.

2.3.3. Colección 4

La Colección 4 amplía la serie histórica de MapBiomas Agua Colombia al periodo 1985–2025, recuperando información para los años anteriores a 1998 e incorporando un año adicional respecto a la colección anterior. Para ello, se mantiene el esquema de clasificación supervisada mediante Random Forest y la regionalización del territorio en 133 regiones de trabajo de 100 × 100 km², incorporando imágenes de los sensores Landsat 5, 7, 8 y 9.

Adicionalmente, se incorporan nuevas clases para diferenciar mejor los cuerpos de agua según sus tipos de uso. Los fundamentos, procedimientos y principales ajustes metodológicos de esta colección se describen en detalle a continuación.

3. Área de estudio y regionalización

3.1. Área de estudio

El área de estudio es el territorio continental de Colombia. Comprende las cinco áreas hidrográficas del país:Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico (IDEAM, 2023) (Figura 6) y los biomas definidos por MapBiomas Colombia (Figura 7)

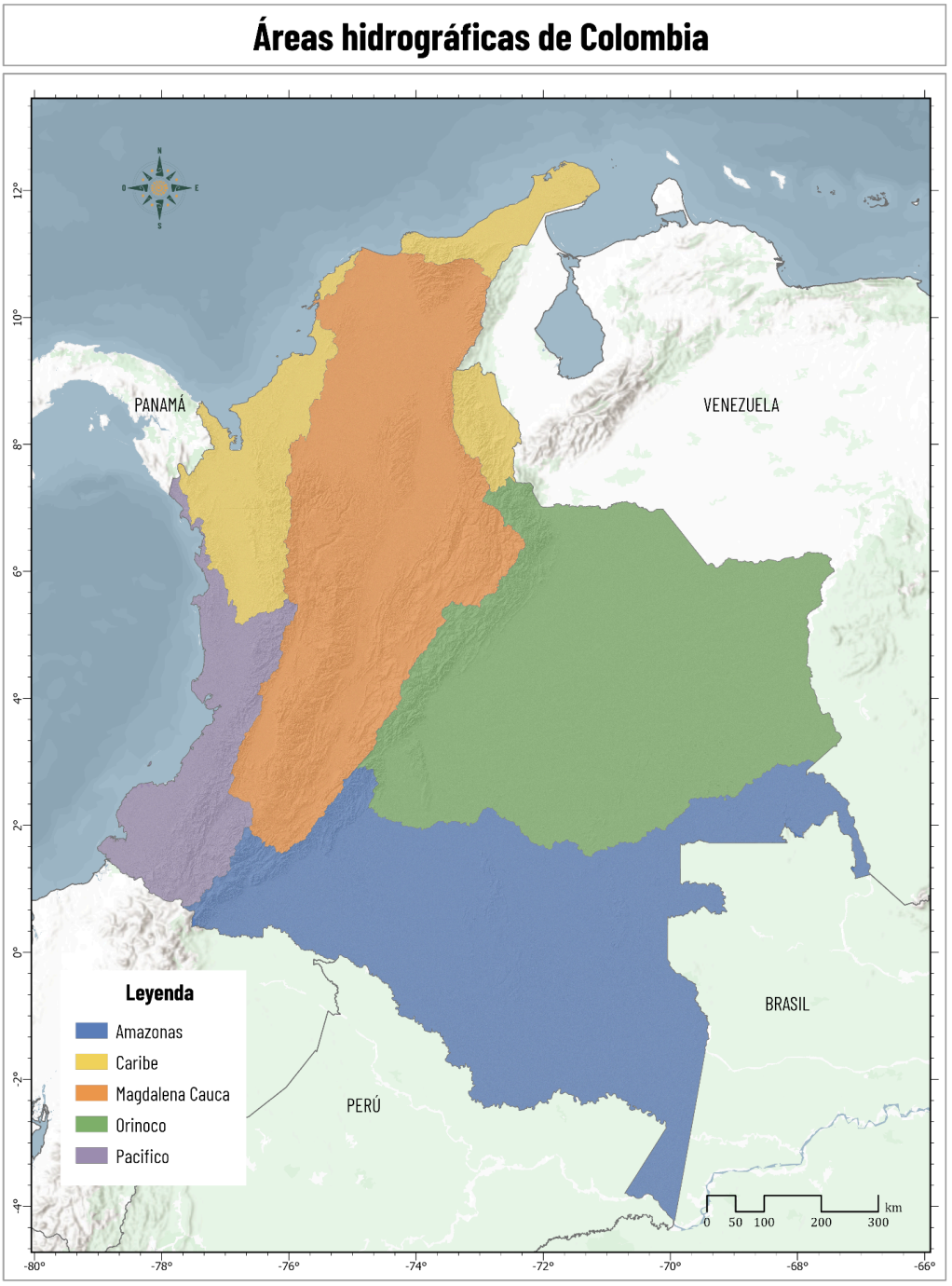


Figura 6. Áreas hidrográficas de Colombia..
Fuente: elaboración propia a partir de IDEAM, 2023.

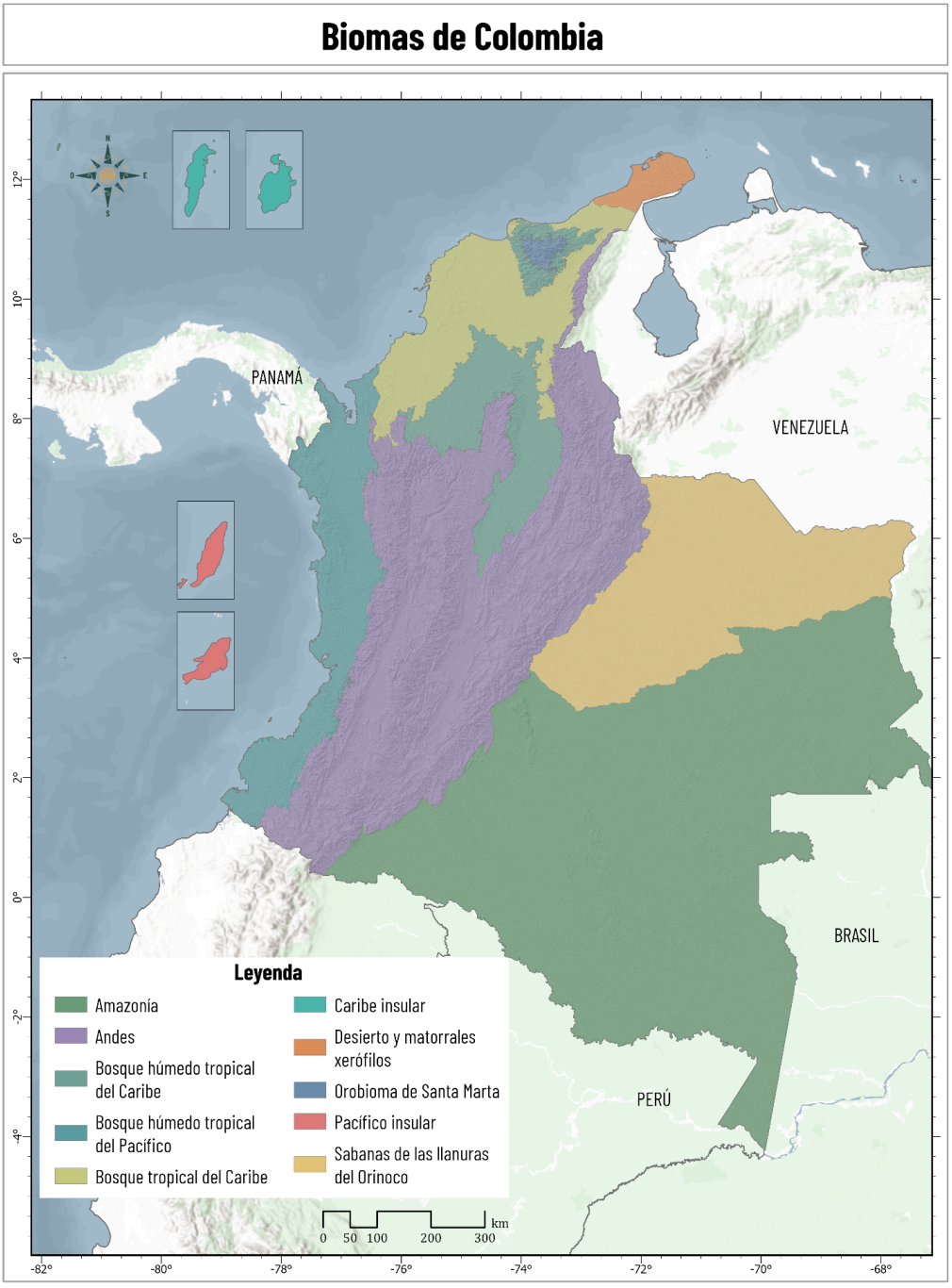


Figura 7. Biomas de Colombia.
Fuente: elaboración propia.

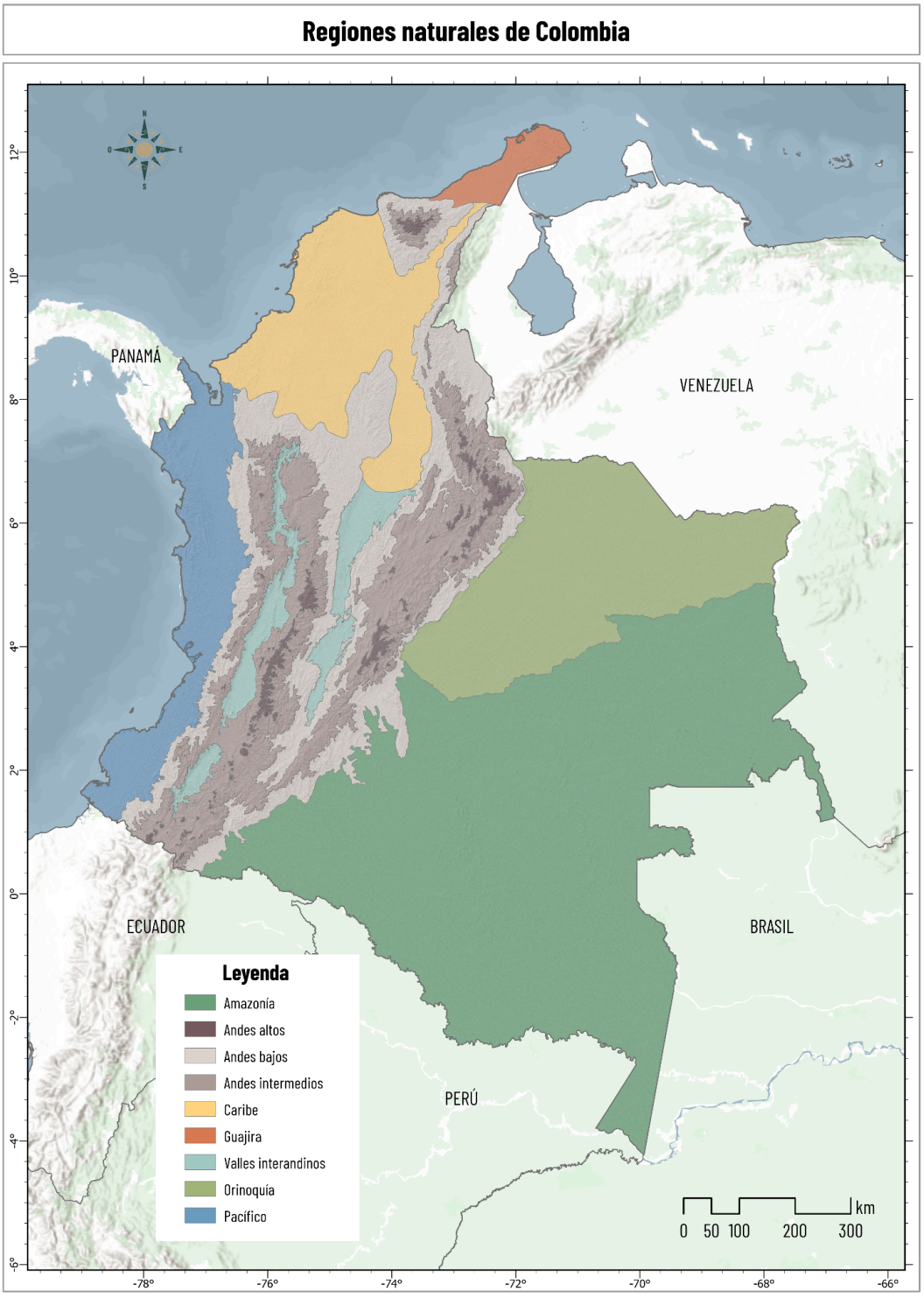


Figura 8. Regiones de Colombia.
Fuente: elaboración propia.

3.2. Retos para la detección de agua en Colombia

Las condiciones del país imponen retos que orientan las decisiones del método:

- **Nubosidad persistente** en el Pacífico y la Amazonía, que reduce el número de observaciones válidas por mes.
- **Menor densidad de escenas Landsat antes de 2000**, que hace menos robustos los primeros años de la serie.
- **Sombra topográfica** en los Andes, que puede confundirse con agua.
- **Turbidez** de ríos con alta carga de sedimentos, como el Magdalena y el Cauca.
- **Sabanas y planicies inundables** de la Orinoquía y el Caribe, con láminas de agua someras y estacionales.
- **Vegetación flotante y agua bajo dosel** en ciénagas y bosques inundables, que los sensores ópticos no detectan de forma confiable

4. Datos

4.1. Imágenes Landsat

Se usaron las imágenes de reflectancia de superficie de la Collection 2, Level 2 del USGS disponibles en Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Corresponden a los sensores Thematic Mapper (TM, Landsat 5), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+, Landsat 7) y Operational Land Imager (OLI y OLI-2, Landsat 8 y 9), con 30 m de resolución espacial. Se incluyeron todas las escenas sobre el territorio colombiano entre 1985 y 2025 con menos del 70 % de nubosidad según sus metadatos.

4.2. Calidad de los mosaicos anuales

El mapa de calidad representa, para cada año, el número de observaciones Landsat válidas y libres de nubes disponibles por píxel. Valores bajos indican menor disponibilidad de información y, por tanto, mayor limitación para interpretar el mosaico. Sin embargo, no equivale directamente a una menor exactitud de la clasificación del agua, que se evaluará en 2027. El número de observaciones se agrupa en nueve clases, de Muy baja a Máxima. Las estadísticas suman, para cada clase, el área en hectáreas de los píxeles que pertenecen a ella. La Tabla 2 resume la proporción del área clasificada en cada clase por periodo.

Tabla 2. Distribución del área clasificada por clase de calidad del mosaico, por periodo (% del área clasificada).

Clase de calidad	1985–1999	2000–2012	2013–2025
Muy baja	0,0	0,0	0,0
Baja	30,0	18,2	18,5

Moderadamente baja	25,7	24,6	27,7
Media-baja	27,8	26,4	28,1
Media	10,2	17,2	14,9
Media-alta	4,5	8,9	6,4
Moderadamente alta	1,3	3,3	2,8
Alta	0,4	1,0	1,2
Muy alta	0,1	0,2	0,3
Máxima	< 0,1	< 0,1	0,1
Área clasificada media (millones de ha)	88,8	109,4	113,2

Fuente: elaboración propia a partir de la serie anual de calidad de los mosaicos de la Colección 4.

Desde 2014 el área clasificada se mantiene entre 112,8 y 114,0 millones de hectáreas, prácticamente todo el territorio continental. Antes de 2000 la cobertura era irregular (Figura 8). En 1988 y 1992 los mosaicos cubren alrededor de un tercio del área máxima (38,0 y 39,5 millones de hectáreas), y en 1985, 1987, 1989, 1990, 1994 y 1995 cubren entre el 65 % y el 80 %.

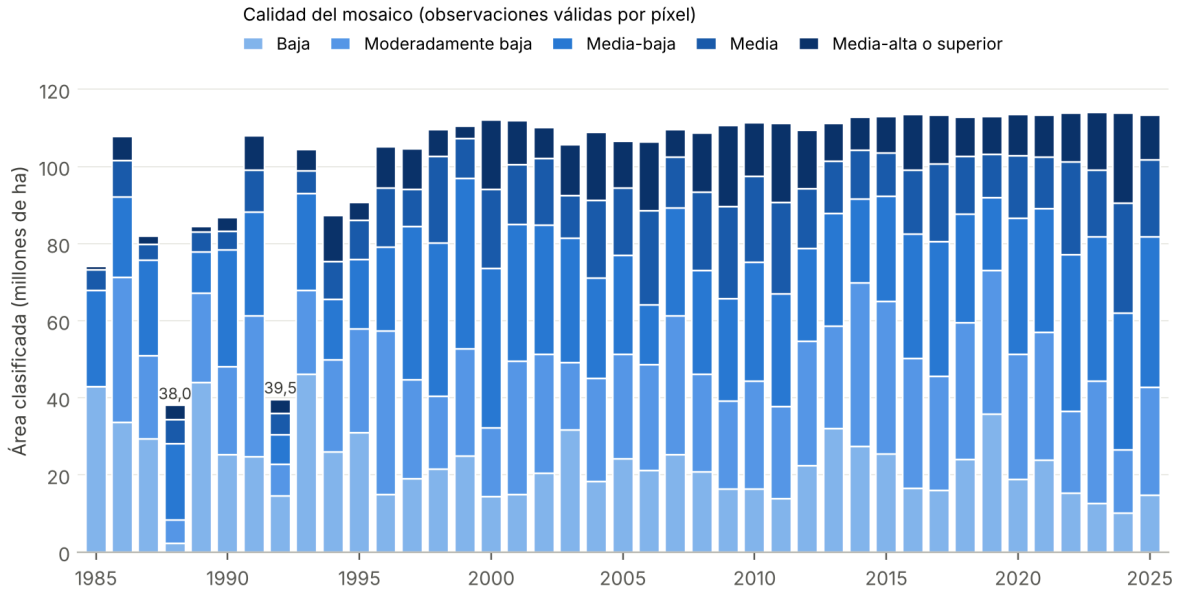


Figura 9. Área clasificada por clase de calidad del mosaico anual, 1985–2025. Las clases Media-alta, Moderadamente alta, Alta, Muy alta y Máxima se agrupan en "Media-alta o superior"; la clase Muy baja no aparece en ningún año. Las cifras sobre las barras de 1988 y 1992 indican el área total clasificada. Fuente: elaboración propia a partir de las estadísticas de calidad de los mosaicos de MapBiomas Agua Colombia, Colección 4

En todos los periodos, la mayor parte del área clasificada está en las clases de calidad baja a media-baja: el 83 % entre 1985 y 1999, y el 69–74 % desde 2000. Las clases moderadamente altas o superiores no superan el 5 % en ningún periodo, y la clase Muy baja no aparece en ningún año. Por eso los primeros años de la serie, y en especial 1988 y 1992, deben interpretarse con cautela.

4.3. Datos auxiliares

Tabla 3. Datos auxiliares usados en el método

Dato	Uso en el método	Fuente y versión
Modelo digital de elevación (SRTM)	Altura de los segmentos; cálculo de HAND	NASA JPL (2013), SRTM Global 1 arc second (v3.0)
HAND (*Height Above the Nearest Drainage*)	Enmascaramiento post-clasificación	Donchyts et al. (2016), Global 30m HAND
MapBiomas Colombia, Colección 4 (cobertura y uso)	Limpieza final y atributos de los segmentos	MapBiomas Colombia (2025), Colección 4.0
Capas de referencia hidrológica	Limpieza final	Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC] (2016–2022), Cartografía Básica Nacional
Capa de embalses e hidroeléctricas	Atributo para la clasificación de tipos de uso	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA] (2024), Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC)

5 Metodología

5.1. Flujo general

La detección del agua se basa en el análisis de mezcla espectral (SMA) de las imágenes Landsat. Sus fracciones, junto con otras variables, alimentan un clasificador supervisado *Random Forest* (Breiman, 2001) entrenado por región y periodo. El resultado mensual se depura con cuatro filtros de post-clasificación y se integra en productos anuales (Figura 9).

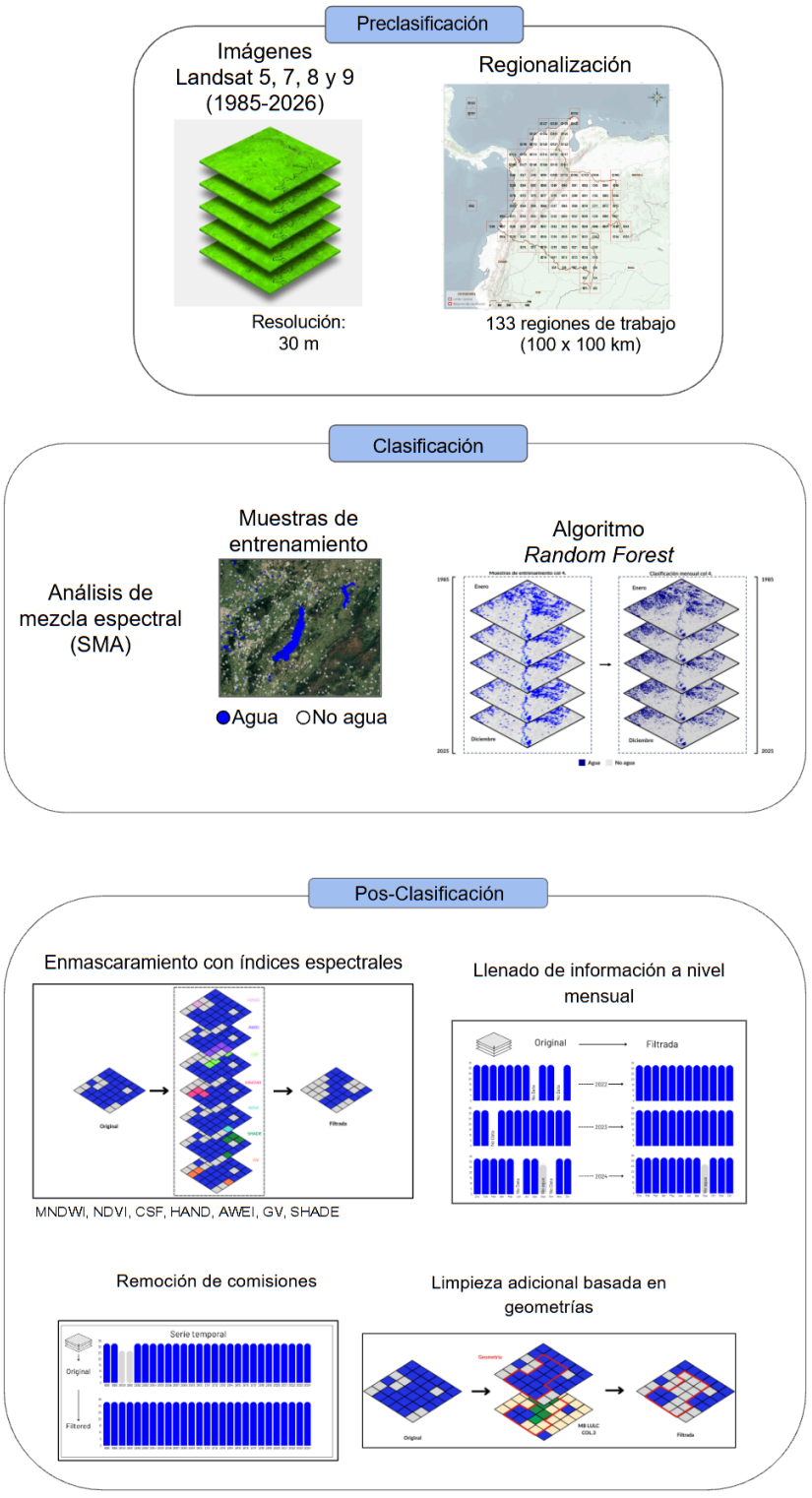


Figura 9. Flujo de clasificación.
Fuente: elaboración propia.

5.2. Regionalización.

Para la clasificación, el país se dividió en 133 regiones de trabajo de 100 km × 100 km (10 000 km²) (Figura 10). Esta grilla, adoptada desde la Colección 3, permite entrenar modelos ajustados a las condiciones de cada zona

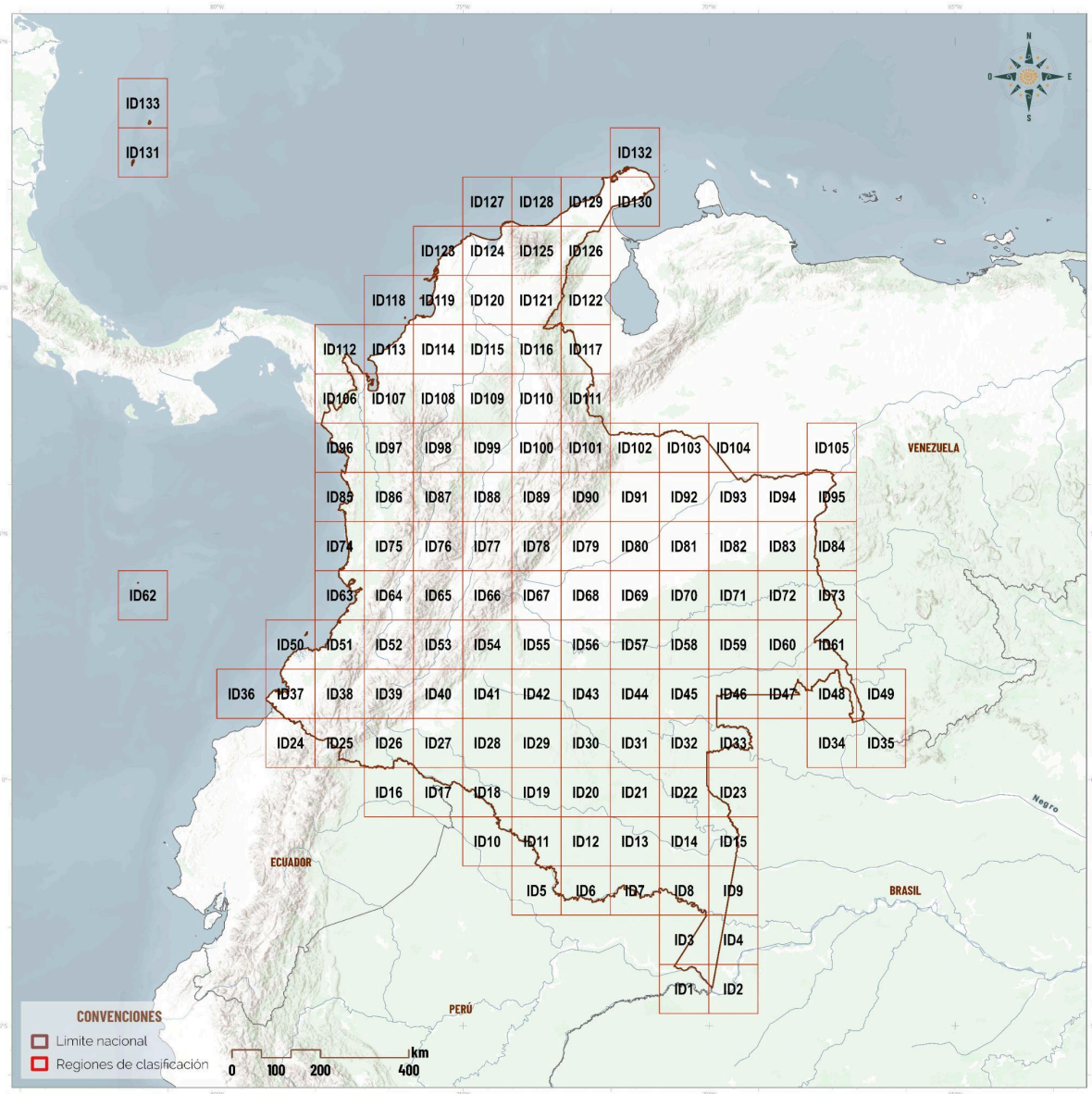


Figura 10. Regiones de clasificación (133 celdas de 100 km × 100 km).
Fuente: elaboración propia.

5.3. Análisis de mezcla espectral

El SMA estima la fracción de cada píxel que corresponde a componentes puros (*endmembers*): vegetación verde (GV), vegetación no fotosintética (NPV), suelo (Soil), nubes (Cloud), sombra

(Shade) y nieve (Snow). Esto permite detectar agua a nivel subpíxel, incluso mezclada con suelo o vegetación, y mapear humedales, llanuras aluviales, ríos estrechos y cuerpos de agua pequeños. No hay un *endmember* de agua: por su baja reflectancia, el agua se expresa como una fracción alta de sombra. Se usa una librería genérica de *endmembers* para Landsat y la función de desmezcla de Google Earth Engine.

El desmezclado espectral lineal se ejecuta mediante el método unmix de Google Earth Engine tomando como referencia los valores de reflectancia de superficie de la **Tabla 4** en las seis bandas ópticas de Landsat (blue, green, red, nir, swir1 y swir2) para los cuatro componentes explícitos (GV, NPV, Soil y Cloud).

Tabla 4. Valores de la librería de *endmembers*

Endmember	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
GV (vegetación verde)	0.0119	0.0475	0.0169	0.625	0.2399	0.0675
NPV (vegetación no fotosintética)	0.1514	0.1597	0.1421	0.3053	0.7707	0.1975
Soil (suelo)	0.1799	0.2479	0.3158	0.5437	0.7707	0.6646
Cloud (nube)	0.4031	0.8714	0.79	0.8989	0.7002	0.6607

Para ejecutar la descomposición espectral, el algoritmo emplea una librería de cuatro *endmembers* puros calibrados sobre las seis bandas reflectantes de Landsat (*blue*, *green*, *red*, *nir*, *swir1* y *swir2*): vegetación verde (GV), vegetación no fotosintética (NPV), suelo expuesto (Soil) y nubes (Cloud), cuyos valores de reflectancia se detallan en la Tabla 4.

Dado que el método `unmix()` de Google Earth Engine realiza, por defecto, una inversión lineal sin restricciones (*unconstrained*), al prescindir de los parámetros nativos `sumToOne` y `nonNegative`, las restricciones físicas de no negatividad y suma igual a la unidad se imponen mediante las siguientes operaciones de posprocesamiento:

- **Truncamiento:** las abundancias obtenidas se acotan inferiormente en cero (`max(0)`), descartando las fracciones negativas carentes de significado físico.
- **Normalización:** cada fracción se divide entre la suma total de los cuatro componentes espectrales (GV + NPV + Soil + Cloud) y se escala al rango porcentual [0, 100], con un límite superior de 100 (`min(100)`), de manera que las proporciones sumen la unidad (100 %), siempre que dicha suma sea distinta de cero.

- **Estimación de la sombra:** la fracción de sombra (Shade), que no forma parte de la matriz de *endmembers*, se deriva como el complemento porcentual de las fracciones correspondientes a las coberturas terrestres, acotado inferiormente en cero: Shade = max(0, 100 − (GV + NPV + Soil)).

Finalmente, las cinco bandas resultantes se almacenan en formato entero de 16 bits (Int16).

5.4. Clasificación supervisada

5.4.1. Muestreo

Las muestras de agua y no agua se toman de la Colección 3 de MapBiomas Agua Colombia para cada año y mes, con un muestreo estratificado y balanceado entre ambas clases (Figura 11).

[Por completar: filtro de píxeles estables y número de muestras por región y mes.]

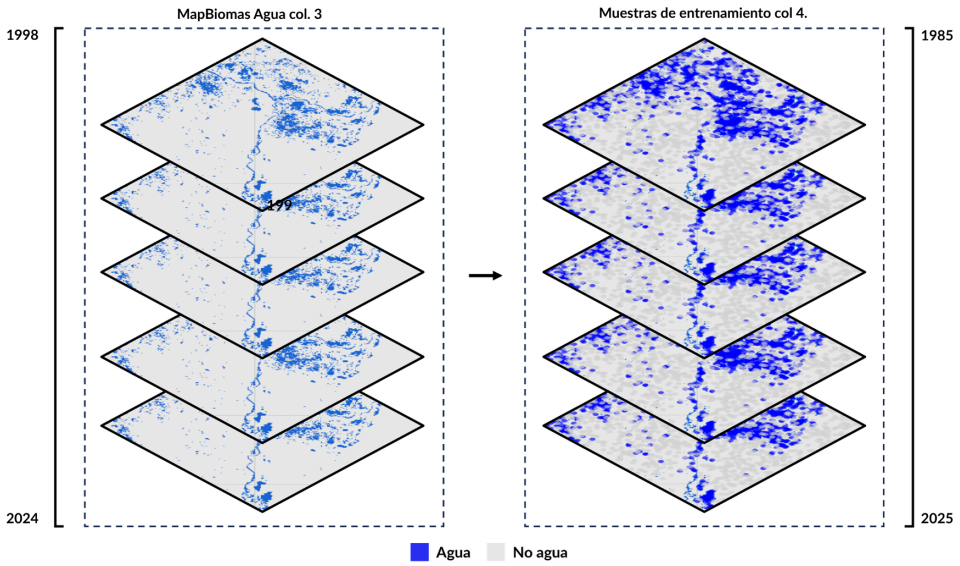


Figura 11. Generación de muestras.
Fuente: elaboración propia.

5.4.2. Entrenamiento y clasificación

El *Random Forest* se entrena en cada región de trabajo con las muestras estratificadas según la proporción regional de cada clase, de modo que el modelo se ajusta a las condiciones de cada región y periodo (Figura 12). La Tabla 4 reúne sus parámetros.

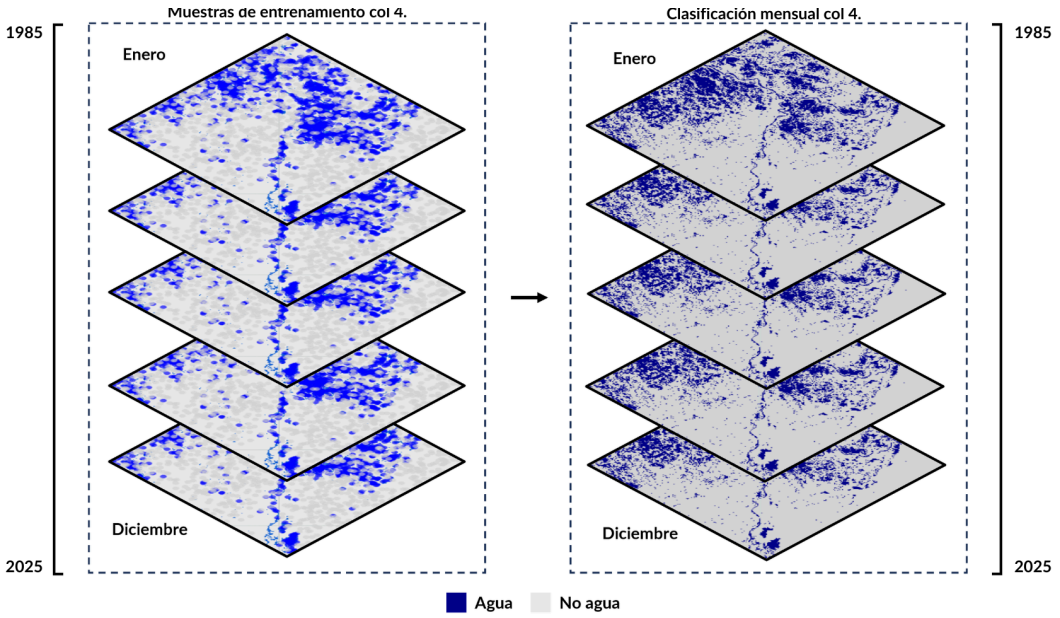


Figura 12. Proceso de clasificación.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Parámetros de la clasificación

Parámetro	Valor
Variables predictoras	- gv, npv, soil, cloud, shade, ndvi, mndwi, awei, ndti, csf. - hand y slope condicionada a la region de clasificación
Número de árboles	100 con bagFraction: 0.5 y seed: 0
Variables por nodo	√(número de variables) = √12 ≈ 3
Muestras por región y mes	3000 muestras de agua y 3000 muestras de no agua, el porcentaje es ajustado mes a mes por el intérprete
Regla de decisión (clase o probabilidad)	Clase discreta por voto mayoritario (modo CLASSIFICATION por defecto de Random Forest): 1 = Agua, 2 = No-agua. Posteriormente se aplican reglas de posprocesamiento: - Si el entrenamiento contiene menos de dos clases, se asigna 2 a toda la imagen,

	- Los píxeles de agua (1) con área urbana acumulada (acc_urban > 0) se remapean a 3. - Los píxeles sin observación válida en el mosaico se asignan a 0. Los meses sin imágenes se codifican como 0, y los meses sin muestras de entrenamiento no se clasifican y quedan enmascarados.

5.5. Post-clasificación

Cuatro filtros mejoran la precisión y la coherencia de los mapas mensuales.

5.5.1. Enmascaramiento con índices espectrales

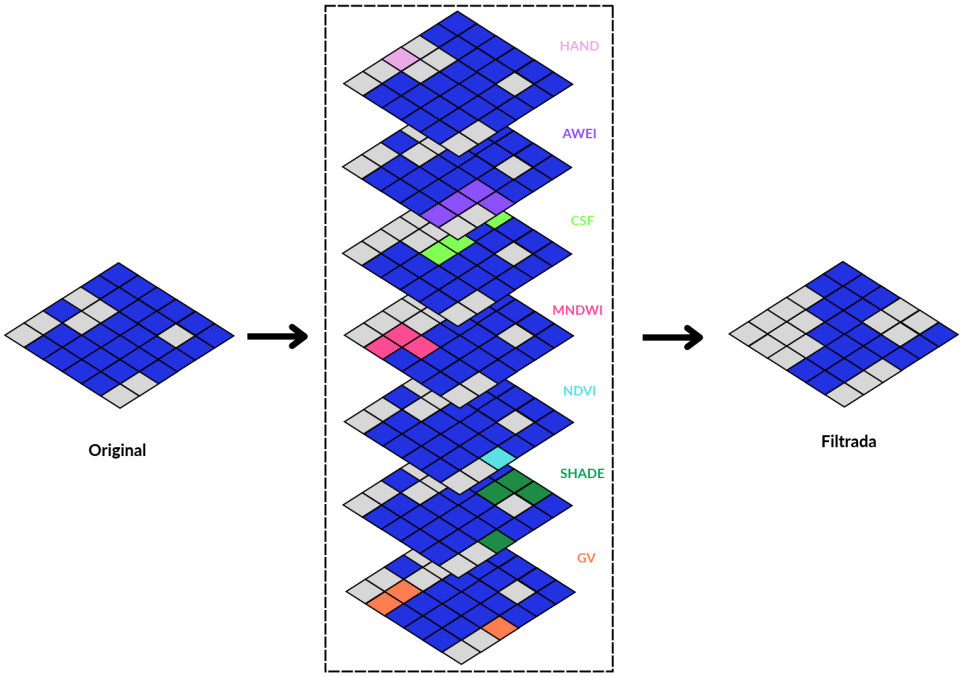


Figura 13. Funcionamiento del enmascaramiento para cada índice.
Fuente: elaboración propia.

Se aplican umbrales sobre los índices de la Tabla 6 para afinar la delimitación del agua y reducir errores de comisión y omisión (Figura 13).

Tabla 6. Índices usados en el enmascaramiento

Índice	Descripción	Referencia
MNDWI	Modificación del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). Utiliza las bandas del verde (GREEN) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) permitiendo resaltar los cuerpos hídricos y reduciendo los ruidos generados por zonas urbanizadas.	(Xu, 2006)
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada para calcular la biomasa, calculado a partir de las bandas del rojo (RED) y el infrarrojo cercano (NIR)	(Szabó et al., 2016)
CSF	El CSF (Canopy Shade Factor) es un parámetro usado para cuantificar la cantidad de sombra generada por la vegetación y se utiliza para reducir los falsos-positivos en la detección de superficies de agua en zonas con cobertura vegetal.	(Schmidt & van der Sluis, 2021)
HAND	La variable HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) correlaciona la altura de un terreno respecto al drenaje más cercano, a partir de un Modelo Digital de Elevación DEM	(Rennó et al., 2008)
AWEI	El Índice Automatizado de Extracción de Agua (Automated Water Extraction Index) mejora la capacidad de clasificar correctamente zonas oscuras y con sombras, las cuales representan un desafío común para técnicas convencionales de clasificación.	(Feyisa et al., 2014)
GV	La Vegetación verde (GV) mejora la detección de agua en llanuras de inundación, humedales y a lo largo de los márgenes de ríos y lagos.	(Souza et al., 2019)
SHADE	Los píxeles de agua suelen presentar valores elevados de sombra fraccional (>65%) gracias a su baja reflectancia.	(Souza et al., 2019)

Umbrales	Guajira	Caribe	Andes	Orinoquía	Amazonía	Pacífico
MNDWI	0 a 70	-100 a 62	0 a 40	50 a 60	50 a 60	80 a 90
NDVI	0 a 250	186 a 250	-	-	-	-
CSF	0 a 80	0 a 32	-	0 a 30	12 a 20	0 a 20
HAND	0 a 5000	-	180 a 230	-	-	-
AWEI	0 a 250	-200 a 102	0 a 90	100 a 107	100 a 110	113 a 117
GV	0 a 250	70 a 250	190 a 200	-	-	78 a 87
SHADE	-	0 a 16	-	-	-	-
SOIL	-	9 a 250	-	35 a 80	50 a 70	5 a 42

5.5.2. Llenado temporal de meses sin información

Los resultados mensuales se integran en el tiempo para cubrir vacíos e inconsistencias en meses sin observaciones válidas (Figura 14). **[Por completar: ventana temporal y regla de llenado.]**

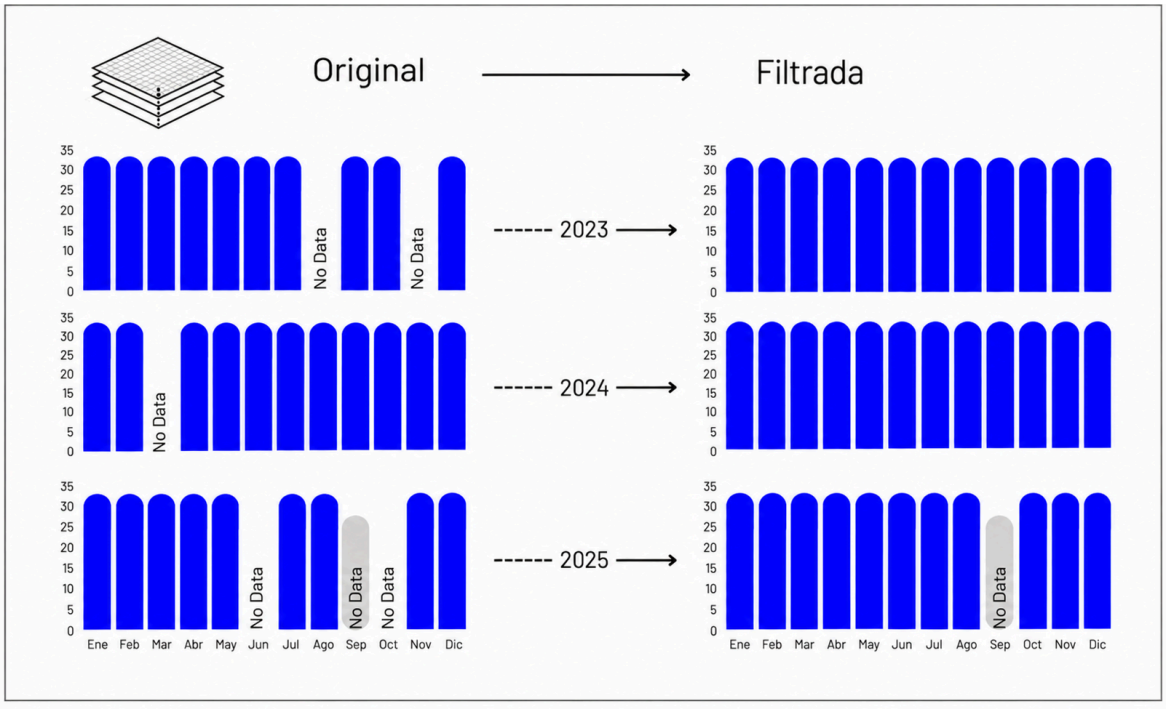


Figura 14. Funcionamiento del enmascaramiento para cada índice.
Fuente: elaboración propia.

5.5.3. Filtro de frecuencia

Se eliminan las detecciones de agua con muy baja ocurrencia en toda la serie, que suelen ser errores de clasificación o eventos atípicos (Figura 15). **[Por completar: umbral de frecuencia.]**

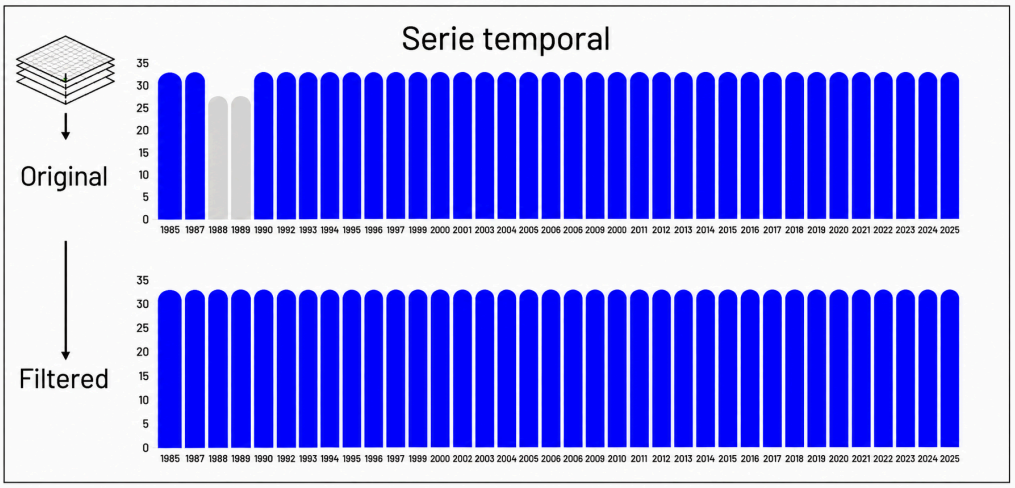


Figura 15. Funcionamiento del filtro de frecuencia.
Fuente: elaboración propia.

5.5.4. Limpieza con capas de referencia

Por último, se depuran artefactos y objetos espurios con capas de referencia hidrológica y con la Colección 4 de MapBiomas Colombia (2025), para que las áreas clasificadas como agua corresponden a espejos de agua reales (Figura 16).

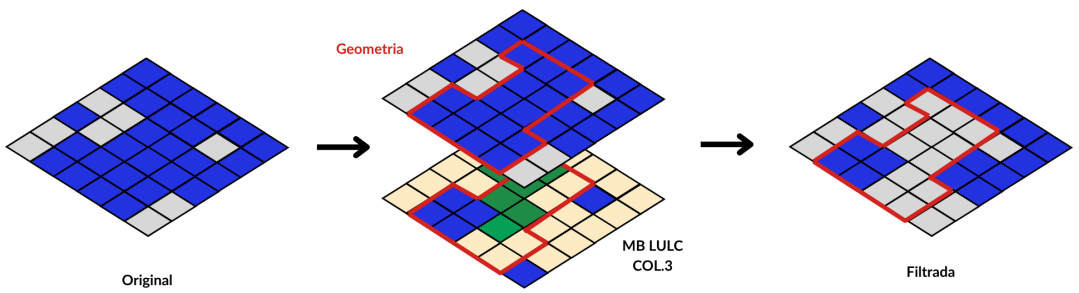
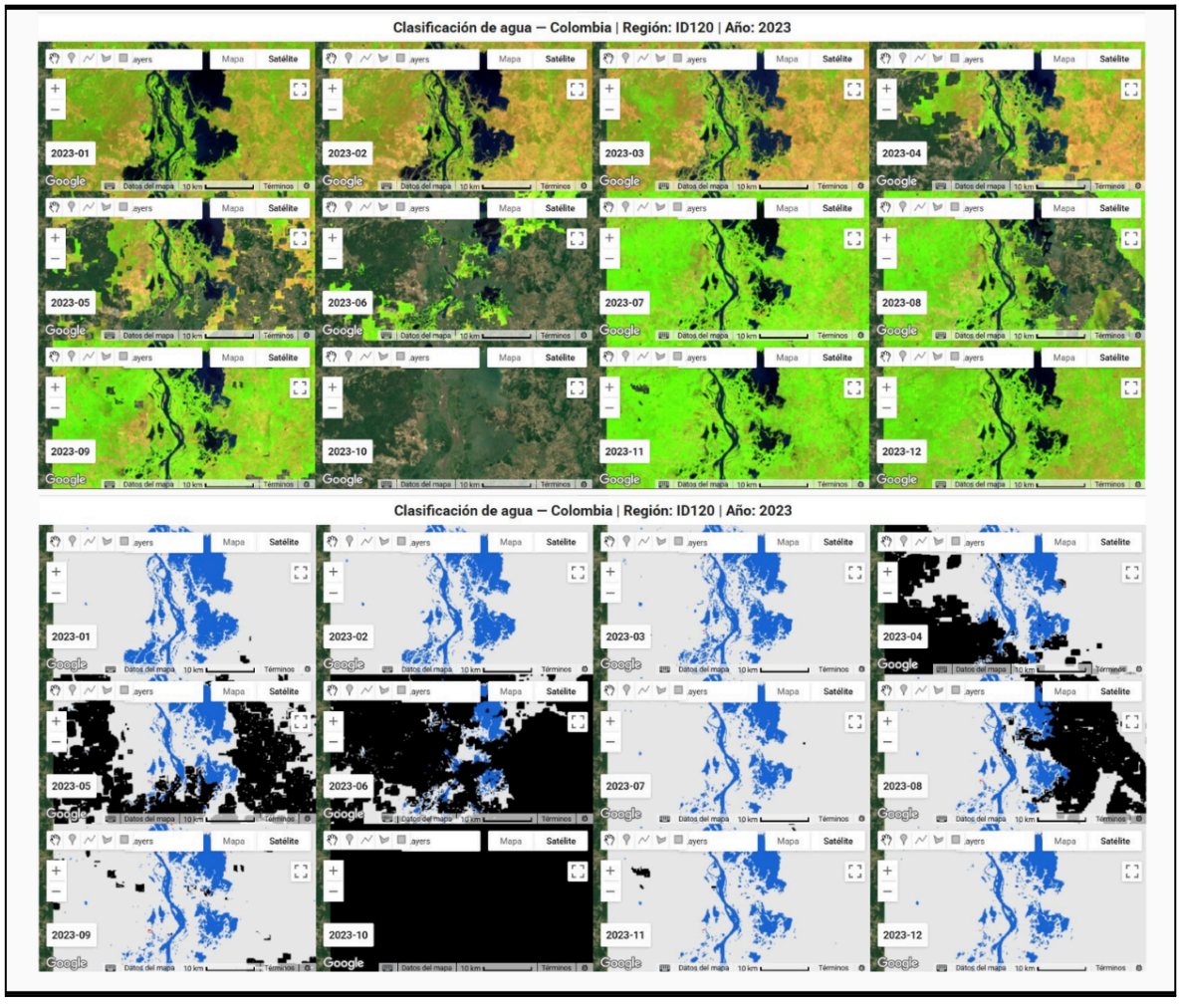


Figura 16. Limpieza con capas de referencia.
Fuente: elaboración propia.

5.6. Producto mensual

El producto mensual identifica, para cada mes de la serie, los píxeles de 30 m cubiertos por agua superficial: 492 mapas, de enero de 1985 a diciembre de 2025. Cada mapa es binario (agua o no agua). Resulta de clasificar las escenas Landsat del mes con el modelo *Random Forest* de cada región (sección 5.4) y de depurar el resultado con los filtros de post-clasificación (sección 5.5). Los meses sin observaciones válidas se completan con el llenado temporal (sección 5.5.2).

Para cada año se obtiene así una secuencia de 12 mapas que muestra cómo el agua se expande y se contrae a lo largo del año: el pulso de inundación de ciénagas y sabanas, la variación del nivel de los embalses o la aparición estacional de cuerpos de agua temporales (Figura 17). El producto mensual es la base de los demás productos. La suma de los meses con agua da la frecuencia anual (de 0 a 12), que distingue el agua permanente de la temporal (sección 5.7). La serie mensual de área, por su parte, alimenta el análisis de tendencias (sección 7.4).



Localización: Ciénega Zarate - Magdalena; Año: 2023 Escala: 19 m; Coordenada: -74.7152, 9.6941

Figura 17. Ejemplo de mapeo mensual de agua superficial (12 meses).
Fuente: elaboración propia.

5.7. Producto anual: agua permanente y temporal

Los mapas anuales distinguen el agua permanente de la temporal según el número de meses en que cada píxel se clasifica como agua. Se considera permanente el agua presente más de 6 meses del año (7 a 12 meses), y temporal la presente entre 1 y 6 meses (Figura 16).

La frecuencia anual (F) es el número de meses del año en que el píxel se clasifica como agua en el producto mensual (sección 5.6), de 0 a 12. A partir de ella:

- **Agua permanente:** $F > 6$, es decir, entre 7 y 12 meses con agua.
- **Agua temporal:** $1 \leq F \leq 6$.
- **Sin agua:** $F = 0$.

5.7.1. Justificación del umbral

El umbral separa el agua que ocupa el píxel la mayor parte del año del agua que solo aparece durante una parte del ciclo hidrológico. Se apoya en cuatro criterios:

1. **Criterio de mayoría del año.** Con más de 6 meses de agua, el espejo de agua domina el píxel durante la mayor parte del año y se mantiene a lo largo de las temporadas secas y lluviosas. Con 6 meses o menos, el agua depende del pulso de inundación: es el caso de las ciénagas que se expanden en temporada de lluvias, las sabanas inundables, los jagüeyes que se secan o los bancos de río que quedan expuestos en aguas bajas.

2. **Coherencia con la red MapBiomas.** MapBiomas Agua Brasil construye sus mapas anuales a partir del número de meses en que cada píxel se clasifica como agua. Usa una frecuencia mayor a 6 meses en la mayoría de los biomas y mayor a 8 meses en el Pampa, donde la ausencia de una estación seca justifica un umbral más restrictivo (Proyecto MapBiomas, 2025). Según esa ATBD, en los biomas con estaciones seca y húmeda un umbral más flexible permite incluir los cuerpos de agua permanentes que son naturalmente más dinámicos. Ese argumento aplica a la mayor parte de Colombia, que por eso adopta el mismo umbral de más de 6 meses.

3. **Diferencia con Global Surface Water**. Global Surface Water considera permanente solo el agua presente los 12 meses y estacional la presente menos de 12 meses (Pekel et al., 2016). En Colombia ese criterio sería demasiado estricto: la nubosidad obliga a llenar meses sin observaciones (sección 5.5.2), y muchas lagunas y ciénagas de planicie, que mantienen su espejo de agua todo el año, cambian de extensión entre temporadas. Con 12 de 12 meses, buena parte de esos cuerpos de agua quedaría como estacional.

4. **Correspondencia con clasificaciones de humedales.** La distinción entre agua permanente y temporal se usa en la cartografía de humedales de Colombia, que separa humedales permanentes y temporales a partir de la frecuencia de inundación; los temporales son la categoría de mayor extensión (Flórez et al., 2016). En la clasificación de Cowardin et al. (1979), el régimen permanentemente inundado tiene agua superficial todo el año, el semipermanente durante toda la estación de crecimiento en la mayoría de los años y el estacional durante períodos prolongados que no llegan al final de esa estación. El umbral de 6 meses agrupa aproximadamente los dos primeros regímenes como agua permanente y el estacional y el temporal como agua temporal.

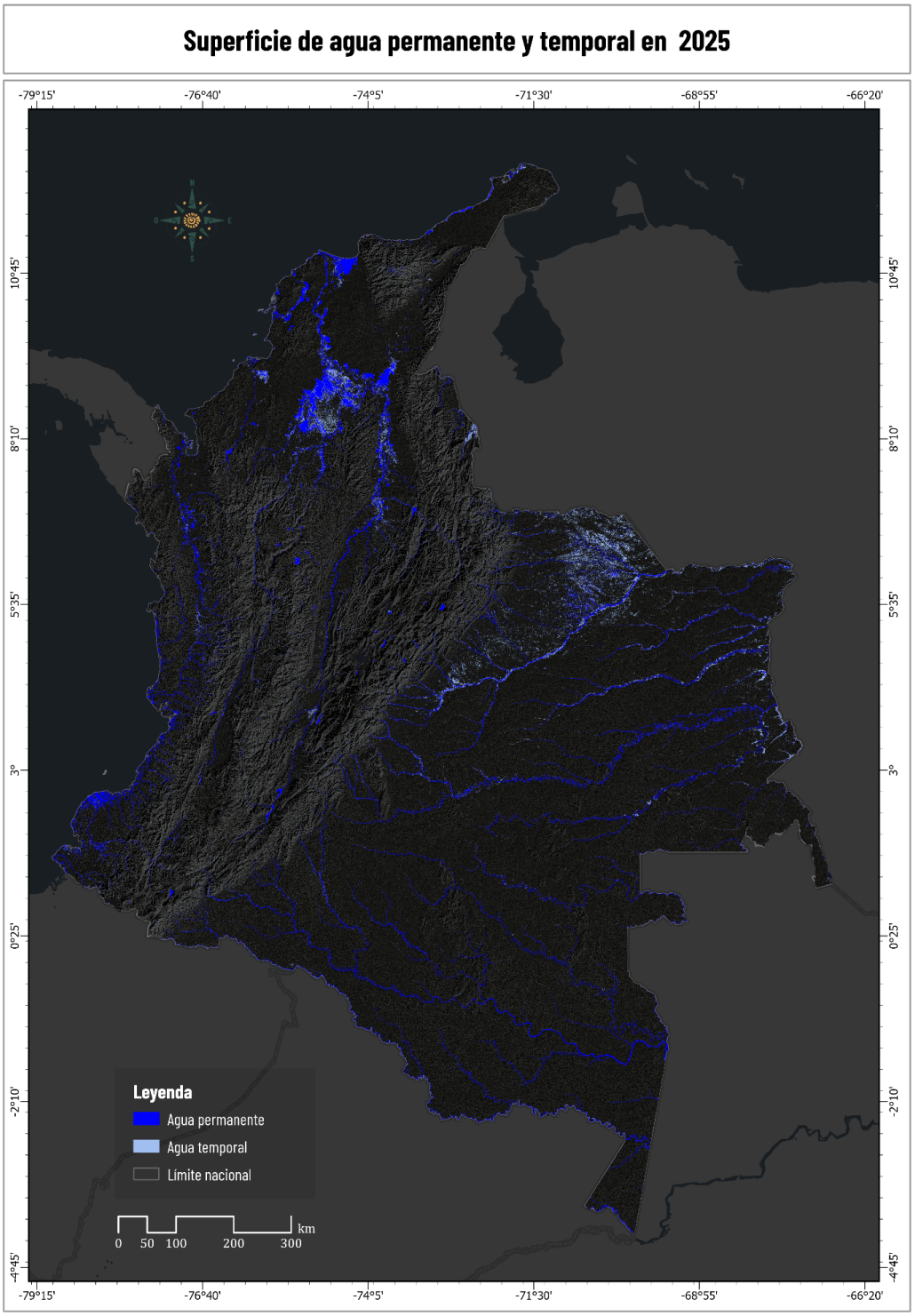


Figura 18. Superficie de agua permanente y temporal en 2025.
Fuente: elaboración propia.

5.8. Clasificación por tipo de uso

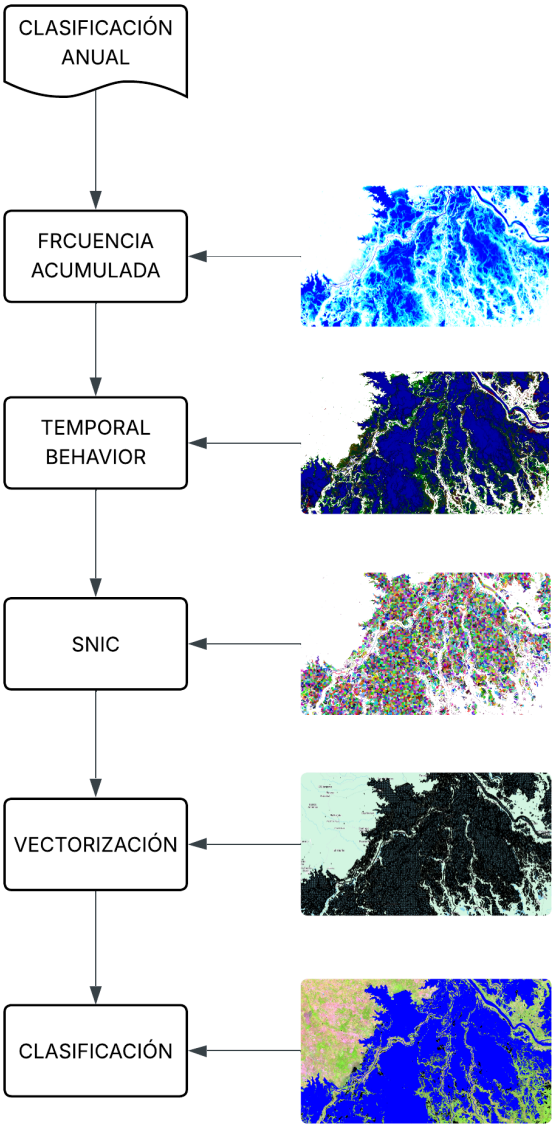


Figura 19. Metodología de clasificación por tipo de uso.
Fuente: elaboración propia.

La clasificación anual por tipo de uso se hace sobre objetos y no sobre píxeles (Figura 19). Sigue el procedimiento de MapBiomas Agua (Proyecto MapBiomas, 2025), cuyo propósito es separar los patrones naturales de los que resultan de la acción humana. Como es anual, permite detectar la aparición de cuerpos de agua antrópicos a lo largo de la serie. Tiene cuatro pasos:

La categorización de los cuerpos hídricos de la nueva colección de MapBiomas Colombia se fundamenta en los avances metodológicos y los productos generados en las colecciones anteriores, complementados con información temática de referencia de alcance nacional.

En las colecciones precedentes, la categorización de los cuerpos hídricos se basó en un enfoque de clasificación orientada a objetos, estructurado en cuatro etapas principales:

1. **Delimitación de objetos (segmentación anual).** Los mapas anuales de frecuencia de agua, derivados de las observaciones mensuales, se segmentan mediante el algoritmo SNIC (*Simple Non-Iterative Clustering*) de Google Earth Engine (Achanta & Süsstrunk, 2017), generando objetos espaciales relativamente homogéneos y regulares. Bajo este enfoque, un mismo cuerpo de agua podría quedar representado por múltiples objetos.

2. **Caracterización de objetos.** A cada objeto se le asignan atributos de cuatro tipos:

    - **Morfológicos:** área, perímetro, compacidad, elongación, convexidad, extensión máxima y número de vecinos.

    - **Geomorfológicos:** altura máxima derivada del modelo digital de elevación SRTM.

    - **Temáticos:** clases de cobertura y uso de la tierra de MapBiomas Colombia y presencia de embalses e hidroeléctricas.

    - **Dinámicos:** frecuencia media de ocurrencia de agua.

3. **Clasificación temática.** Los objetos se clasificaron mediante el algoritmo *Random Forest*, entrenado con muestras recolectadas por bioma sobre grillas distribuidas espacial y temporalmente a lo largo de la serie histórica.

4. **Consistencia temporal.** Se aplicaron procedimientos de posclasificación orientados a reducir las transiciones temporalmente improbables entre categorías de cuerpos hídricos, como los cambios recurrentes entre embalses y cuerpos de agua naturales.

Para la nueva colección, este procedimiento no se ejecutó nuevamente de manera directa. En su lugar, se incorporaron los productos de categorización hídrica de las colecciones anteriores como insumos de referencia, preservando así la base conceptual y el conocimiento temático derivados de la metodología original.

La categorización del nuevo producto se realizó mediante la integración espacial de estos insumos históricos con información temática de alcance nacional sobre ciénagas, lagunas, ríos, humedales y manglares, así como con los mapas de cobertura y uso de la tierra de MapBiomas Colombia.

Este enfoque permite aprovechar el conocimiento acumulado en las colecciones precedentes y complementar la caracterización de los cuerpos hídricos mediante información geográfica específica del territorio colombiano. De esta manera, el producto resultante mantiene la

continuidad metodológica con las colecciones anteriores, al tiempo que incorpora nuevas fuentes de información para fortalecer su representación temática y su correspondencia con las características hidrográficas y ambientales del país

5.9. Leyenda

La leyenda tiene dos niveles. El primero separa el agua según su grado de naturalidad: natural o antrópica. El segundo distingue siete tipos de uso: ríos, lagos y lagunas, y ciénagas y zonas pantanosas, dentro del agua natural; y embalses, agua asociada a minería, estanques acuícolas y otros usos antrópicos, dentro del agua antrópica (Tabla 7 y Figura 20).

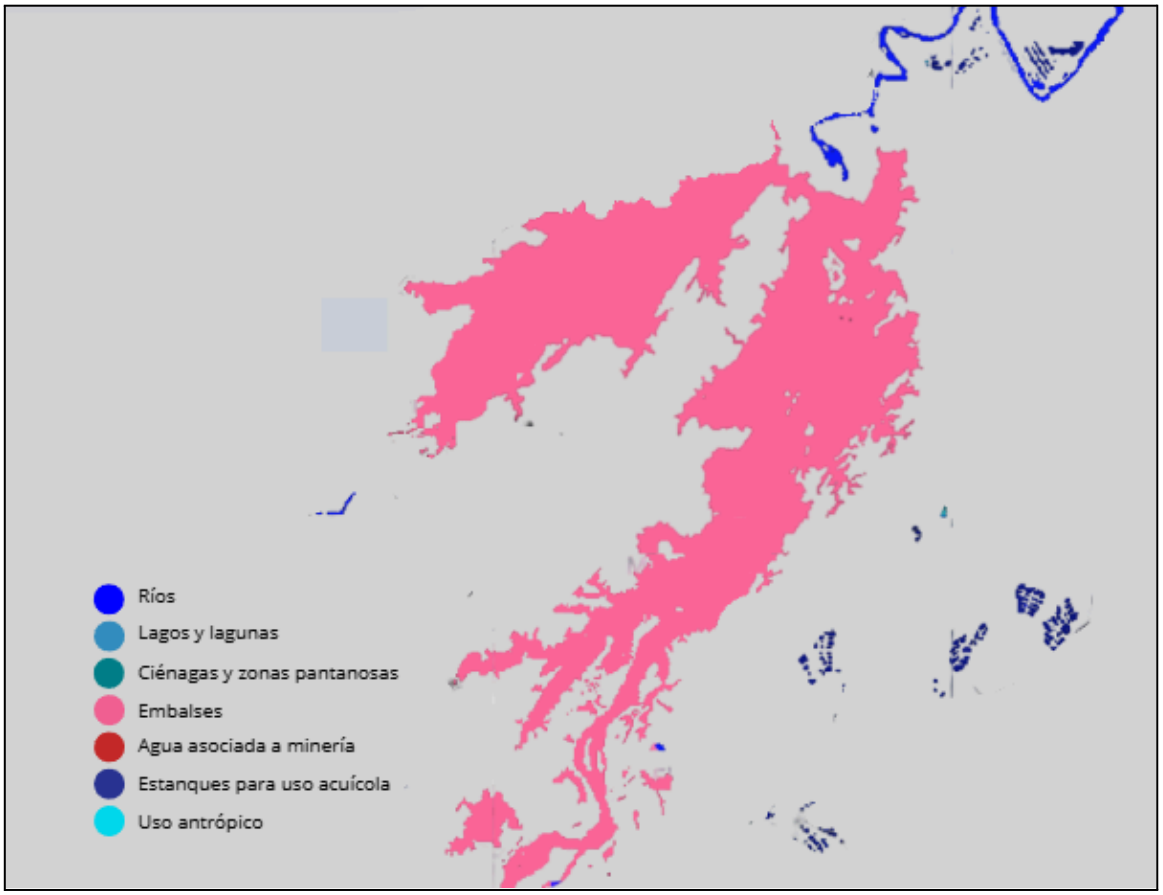


Figura 20. Ejemplo de las categorías de tipo de uso.
Fuente: elaboración propia.

La categorización de los tipos de uso se estructuró en un esquema jerárquico de dos niveles basado en su grado de naturalidad. En el primer nivel, las superficies hídricas se clasificaron en dos grandes grupos: Naturales y Antrópicos. En el segundo nivel, cada grupo se detalla en categorías específicas que permiten distinguir los diferentes tipos de uso presentes en el territorio. En el caso de las superficies hídricas naturales, se incluyen ríos, lagos, lagunas, ciénagas y zonas pantanosas. Por su parte, las superficies de agua antrópicas integran las clases

asociadas a embalses, agua asociada a minería, estanques para uso acuícola y uso antrópico resultantes de la intervención humana (Tabla 7).

Tabla 7. Leyenda nivel 1 y nivel 2 de naturalidad para la Colección 4.0 de MapBiomas Agua

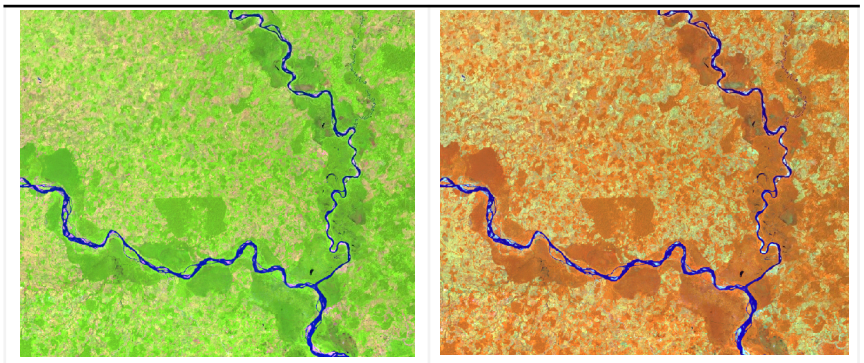
NIVEL 1				NIVEL 2			
ID	Clase nivel 1	HEXADECIMAL CODE	COLOR	ID	Clase nivel 2	HEXADECIMAL CODE	COLOR
1	Natural	0000FF		11	Ríos	0000FF	
				15	Lagos y lagunas	3690C0	
				16	Ciénagas y zonas pantanosas	02818A	
2	Antrópico	00D7EE		21	Embalses	F06292	
				24	Agua asociada a minería	BD0027	
				23	Estanques para uso acuícola	283593	
				22	Uso antrópico	00D7EE	

5.9.1. Agua natural

Incluye todos las superficies de agua de origen natural que no presentan intervención humana significativa. Esta clase abarca ríos, lagos, lagunas, ciénagas y humedales naturales donde es claramente percibible el espejo de agua

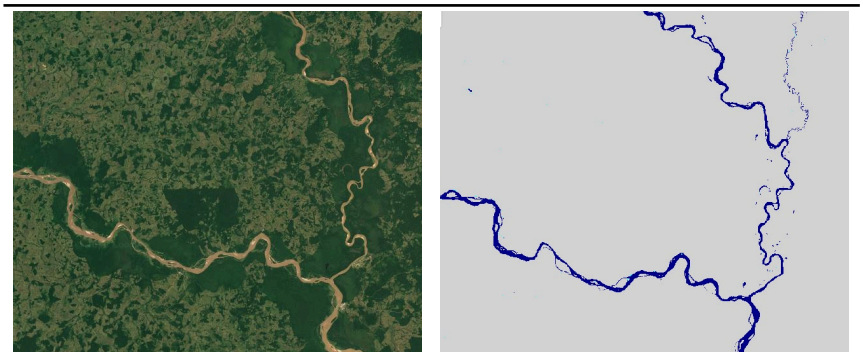
Ríos

Corrientes continentales de agua de origen natural que fluyen continuamente a través de un cauce definido hacia el mar, un lago u otro río, caracterizadas por la presencia claramente detectable del espejo de agua libre. (Figura 21).



RGB 654 L8
RGB 543 L5 - L7 - L8 - L9

RGB 564 L8
RGB 453 L5 - L7 - L8 - L9



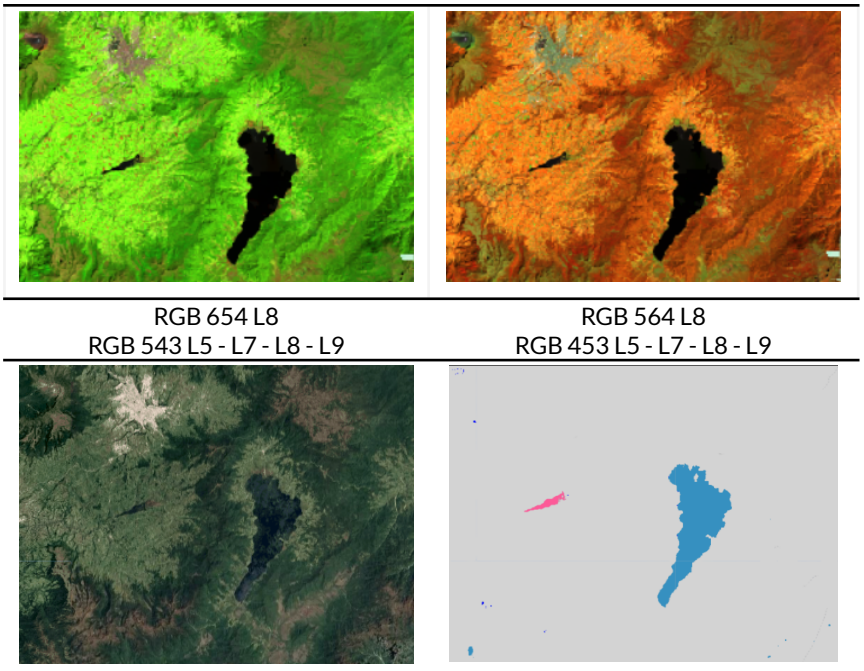
Google Earth	MapBiomas

Localización: Río Caquetá, Límite Caquetá - Putumayo; Año: 2025
Escala: 5 km; Coordenada: -75.3347, 0.7725

Figura 21. Clase Ríos.
Fuente: elaboración propia.

Lagos y lagunas

Superficies de agua natural retenidas en depresiones continentales. Incluye lagos grandes y profundos y lagunas de origen glaciar, volcánico, tectónico o fluvial (meandros abandonados), con espejo de agua claramente perceptible (Figura 22).



RGB 654 L8 RGB 543 L5 - L7 - L8 - L9	RGB 564 L8 RGB 453 L5 - L7 - L8 - L9
Google Earth	MapBiomas

Localización: Laguna de la Cocha, Pasto - Nariño; Año: 2025
Escala: 1 km; Coordenada: -77.1476, 1.089

Figura 22. Clase Lagos y lagunas.
Fuente: elaboración propia.

Ciénagas y zonas pantanosas

Superficies de agua someras en planicies de inundación, con una lámina de agua permanente, estacional o fluctuante, libre o asociada a vegetación hidrófita. Incluye ciénagas, pantanos, esteros y turberas, cuya extensión varía con los pulsos hidrológicos (Figura 23).

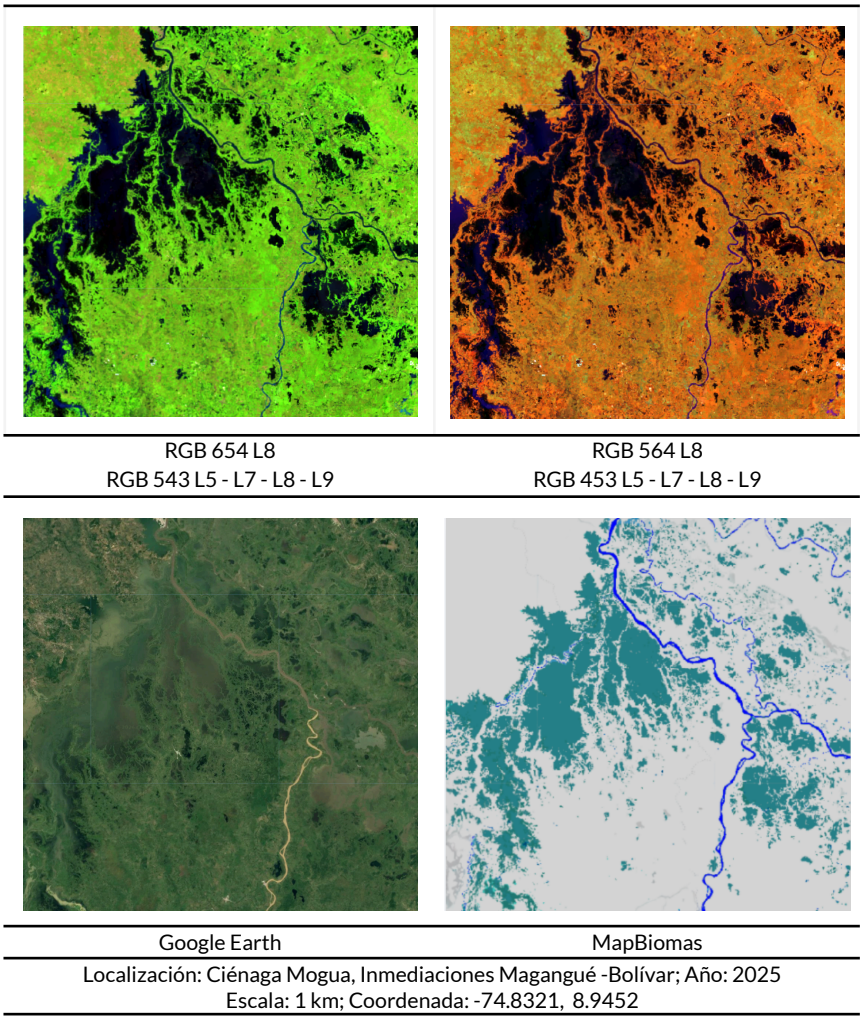


Figura 23. Clase Ciénagas y zonas pantanosas.
Fuente: elaboración propia.

5.9.2. Agua antrópica

Embalses

Acumulaciones artificiales de agua retenida por presas o diques para almacenar y regular caudales, destinadas a generación hidroeléctrica, consumo, riego, turismo o conservación (Figura 24).

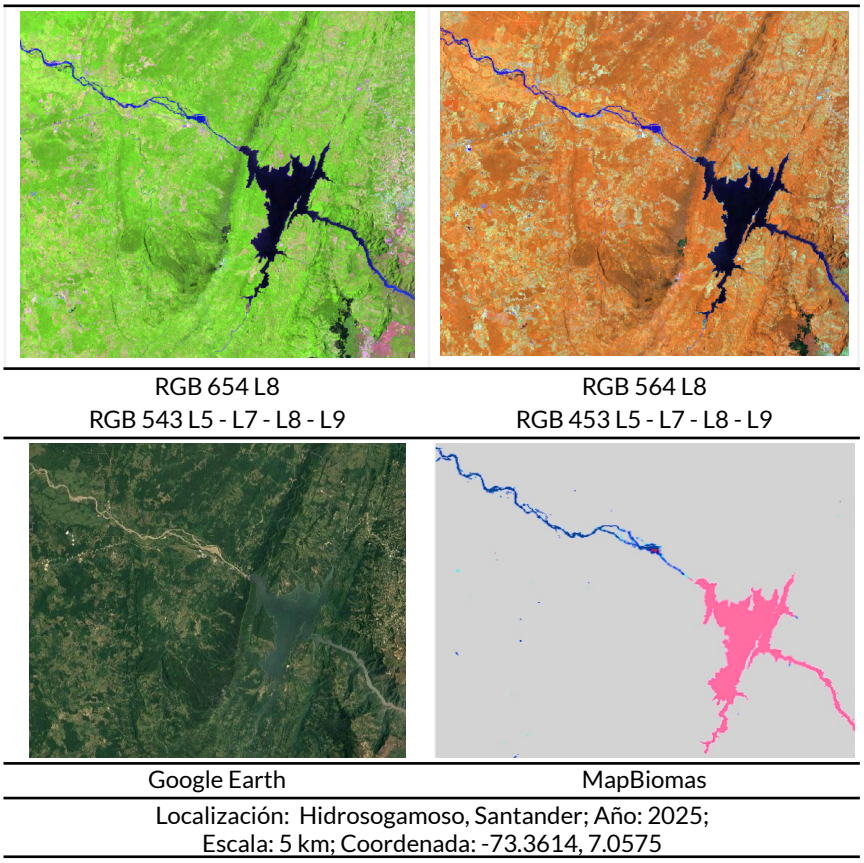
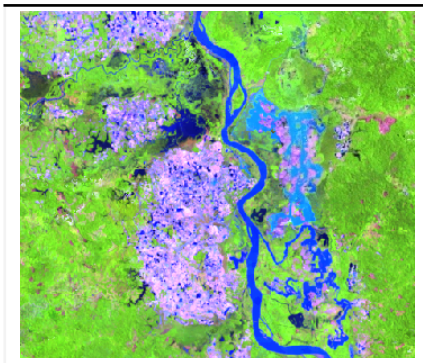


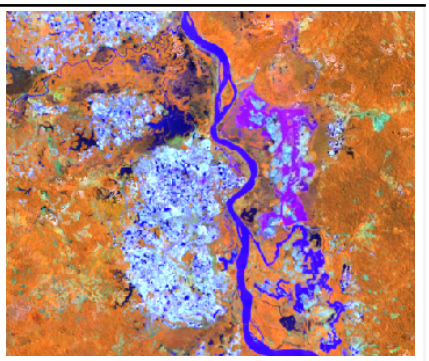
Figura 24. Clase Embalses.
Fuente: elaboración propia.

Agua asociada a minería

Superficies de agua formadas por procesos de extracción, remoción de materiales, acumulación de sedimentos o excavaciones mineras (Figura 25)



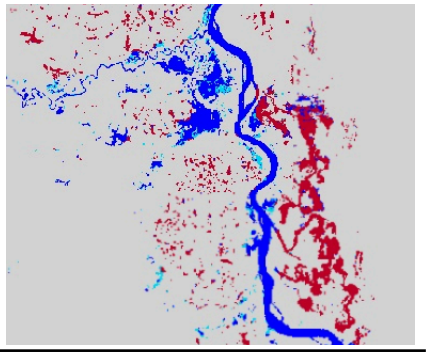
RGB 654 L8
RGB 543 L5 - L7 - L8 - L9



RGB 564 L8
RGB 453 L5 - L7 - L8 - L9



Google Earth



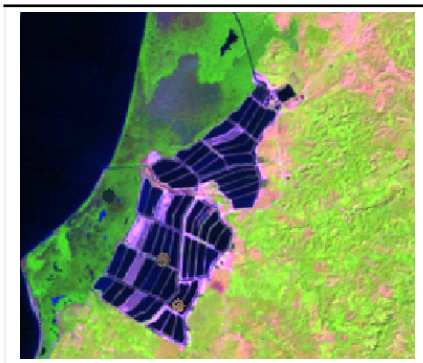
MapBiomas

Localización:La Concha, Antioquia; Año: 2019;
Escala: 1 km; Coordenada: -74.78371, 7.86517

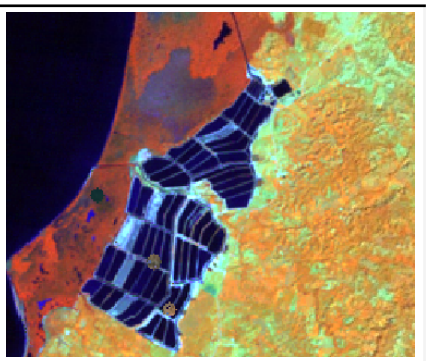
Figura 25. Clase Agua asociada a minería.
Fuente: elaboración propia.

Estanques para uso acuícola

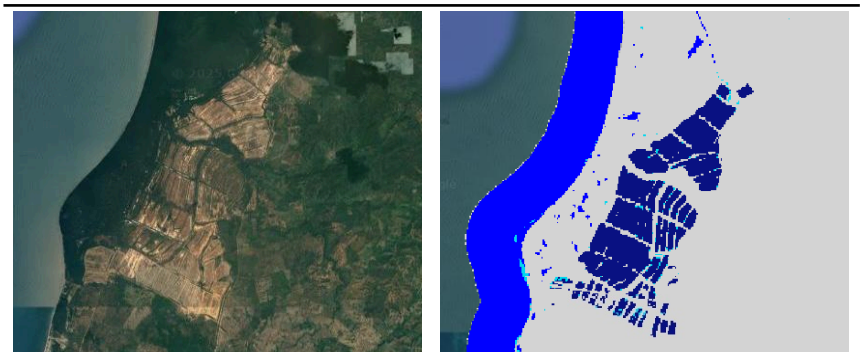
Estanques y reservorios destinados a la cría y cultivo de peces, camarones y otros crustáceos en ambientes de agua dulce o salada. (Figura 26).



RGB 654 L8
RGB 543 L5 - L7 - L8 - L9



RGB 564 L8
RGB 453 L5 - L7 - L8 - L9

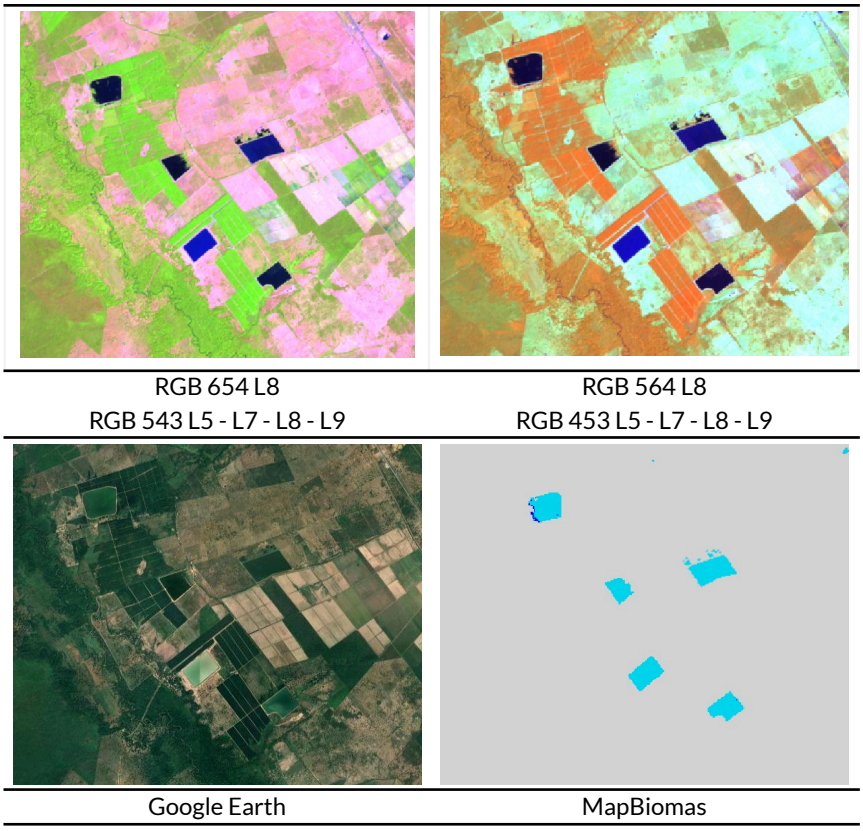


Google Earth	MapBiomas
Localización: Libertad, Sucre; Año: 2000; Escala: 1 km; Coordenada: -75.57289, 9.94051	

Figura 26. Clase Estanques acuícolas.
Fuente: elaboración propia.

Uso antrópico

Otras superficies de agua creadas o modificadas por actividades humanas tales como jagüeyes, reservorios, pequeñas represas, canales y cultivos temporalmente inundados. (Figura 27).



RGB 654 L8 RGB 543 L5 - L7 - L8 - L9	RGB 564 L8 RGB 453 L5 - L7 - L8 - L9
Google Earth	MapBiomas

Localización: Vía Lejanías - Aguas Claras, Meta; Año: 2022
Escala: 200 m; Coordenada -73.90554, 3.47547

Figura 27. Clase Uso antrópico.
Fuente: elaboración propia.

6. Calidad del dato

6.1. Estado de la evaluación de exactitud

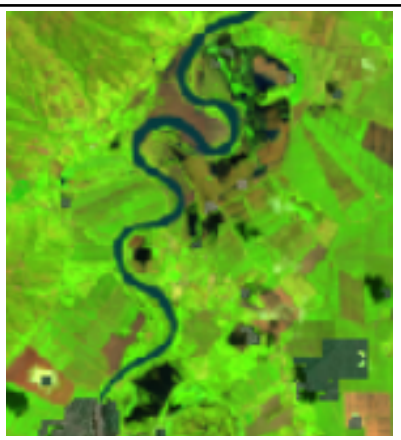
La exactitud temática de la Colección 4 todavía no se ha evaluado; la evaluación está prevista para 2027. Hasta entonces, las cifras de superficie, transiciones y tendencias deben usarse sabiendo que no tienen una medida de error asociada.

6.2. Controles de calidad de esta versión

- **Densidad de observaciones:** número de observaciones Landsat válidas por mes, región y década, para identificar dónde y cuándo el dato es más débil. Un primer indicador anual es la calidad de los mosaicos (sección 4.2 y Tabla 2).

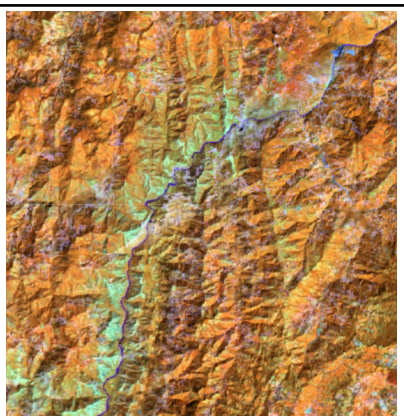
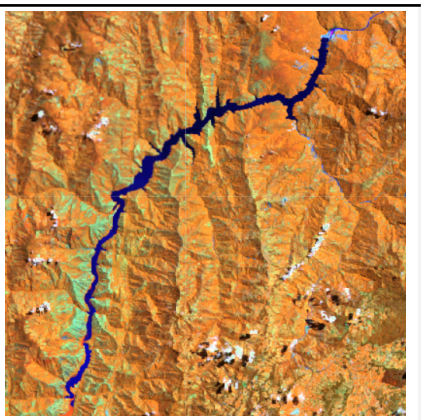
- **Revisión visual por región:** inspección de los mapas mensuales y anuales sobre imágenes Landsat y de alta resolución en zonas representativas de cada región.

    - Se realizó una inspección visual de los mosaicos satelitales correspondientes a las temporadas seca y húmeda de cada región de estudio, con el propósito de evaluar las variaciones espectrales y las condiciones de observación asociadas a cada periodo. Este procedimiento permitió establecer que los criterios de clasificación debían mantener un comportamiento consistente frente a las condiciones propias de ambas temporadas, evitando que las diferencias estacionales generarán cambios en la identificación de las coberturas.

	
RGB 654 L8 RGB 543 L5 - L7 - L8 - L9 Temporada Seca Mes de Diciembre 2015	RGB 654 L8 RGB 543 L5 - L7 - L8 - L9 Temporada Húmeda Mes de Mayo 2022
Localización: Región 64	

- Adicionalmente, para las regiones con relieve montañoso, se incorporó el modelo digital de elevación (DEM) como insumo complementario, considerando la influencia de las condiciones topográficas sobre la respuesta espectral de las imágenes. En estos sectores se contempló la aplicación de correcciones topográficas, con el fin de reducir los efectos asociados a la iluminación diferencial y a la orientación de las pendientes, y favorecer una mayor consistencia espacial y temporal de los resultados de clasificación.

- Para las regiones que presentan infraestructura hidroeléctrica, se tuvo en cuenta el año de inicio del llenado de los embalses como criterio temporal de referencia para el proceso de clasificación. Esta consideración permitió interpretar los cambios en la cobertura de agua asociados a la construcción y entrada en operación de los proyectos hidroeléctricos, evitando atribuir estas variaciones a comportamientos naturales del sistema hídrico. De esta manera, se buscó mejorar la correspondencia entre los resultados de clasificación y la dinámica real de los cuerpos de agua en cada región.

	
RGB 564 L8 (2017) RGB 453 L5 - L7 - L8 - L9	RGB 564 L8 (2018) RGB 453 L5 - L7 - L8 - L9
Localización: Hidroeléctrica Ituango	

6.3. Plan de evaluación 2027

La evaluación usará un muestreo independiente del entrenamiento, estratificado por región y periodo, con interpretación visual de imágenes Landsat y de alta resolución. Reportará exactitud global y errores de omisión y comisión por región, década y clase de tipo de uso. Los resultados se publicarán en la versión 1.1 de esta ATBD.

7. Productos y análisis derivados

Los principales resultados de la Colección 4 están disponibles en la plataforma web pública, donde se incluyen tres coberturas de datos: superficie de agua, transiciones y tendencias.

7.1. Superficie de agua

La capa corresponde a los datos de la cobertura anual de agua superficial. Los datos presentan superficie de agua mapeada considerando los diferentes rangos temporales dentro del intervalo de 1985 al 2025, incluyendo su respectiva frecuencia relativa. La totalidad de la superficie mapeada corresponde a la superficie continental de Colombia. Los datos disponibles están enmarcados en diferentes unidades territoriales como bioma, cuenca hidrográfica, departamentos, municipios, áreas protegidas, territorios indígenas, entre otros (consulte la plataforma de MapBiomas Colombia para ampliar las capas dispuestas). El usuario puede seleccionar diferentes territorios y rangos temporales, haciendo que el mapa, gráficos y estadísticas se actualicen (Figura 28).

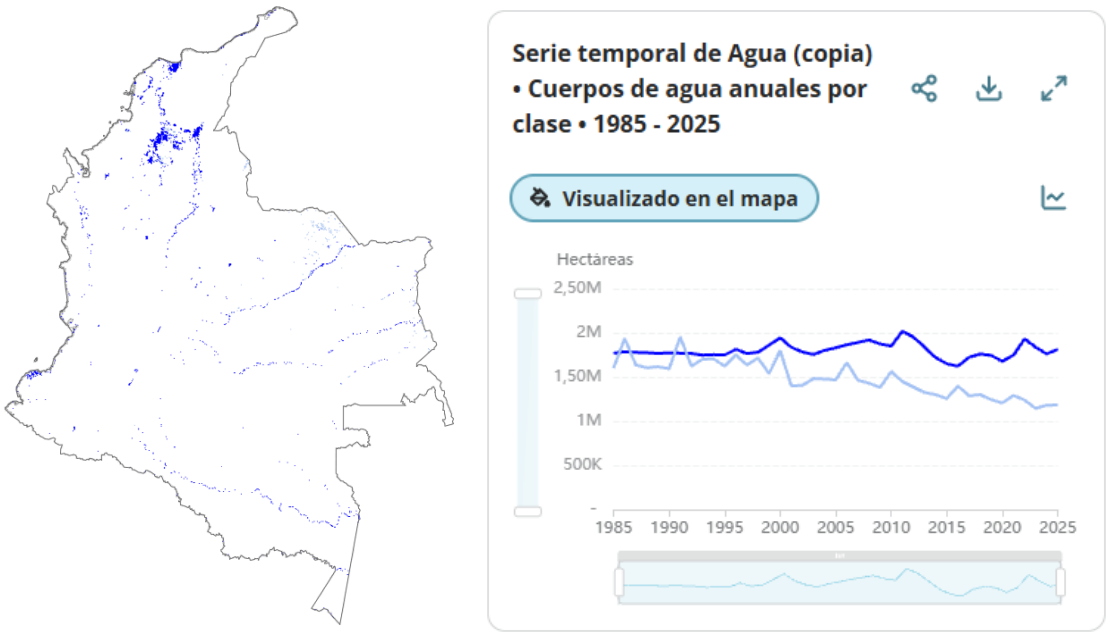


Figura 28. Ejemplo de visualización de los datos de la capa de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomas Agua.
Fuente: elaboración propia.

7.2. Transiciones de superficie de agua

Esta capa representa la superficie de agua que ha disminuido, ha incrementado, se ha mantenido constante o se presenta de manera esporádica a lo largo de la serie temporal. Fue posible identificar estas áreas utilizando el número total de píxeles clasificados como agua en toda la serie anual (ej., 41 años). Se elaboró una composición de color en RGB para facilitar la visualización e identificación de estas categorías (Figura 29).

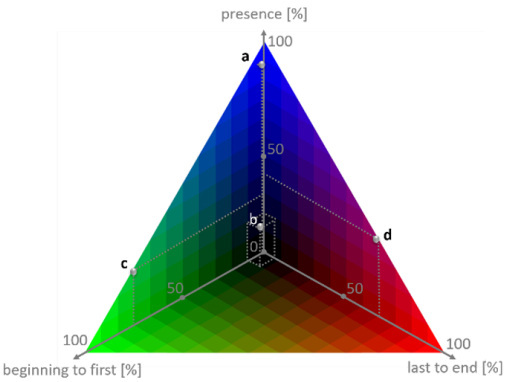


Figura 29. Dinámica de superficie de agua RGB. El color azul indica persistencia, ya que el total de años fueron clasificados como superficie de agua; verde, incrementó (los años desde el principio de la serie temporal hasta la primera clasificación); y rojo disminución. Los colores negros y oscuros indican superficies de agua esporádicas o no permanentes. Fuente: MapBiomas Agua (2023).

Primero, para caracterizar la persistencia se asignó el color azul al total de años clasificados como superficie de agua. Segundo, se seleccionó el número de años desde el principio de la serie temporal hasta la aparición de la primera clasificación de agua y se le asignó el color verde para caracterizar el incremento.

Finalmente, se seleccionó el número de años desde la última observación de superficie de agua hasta el final de la serie temporal, para indicar la disminución de la superficie de agua en color rojo. De este modo, las superficies de agua permanentes aparecerán predominantemente azules, las superficies de agua temporales aparecerán negras si éstas ocurrieron de manera esporádica, la pérdida de superficie de agua en color rojo y superficies nuevas en color verde (Figura 30).

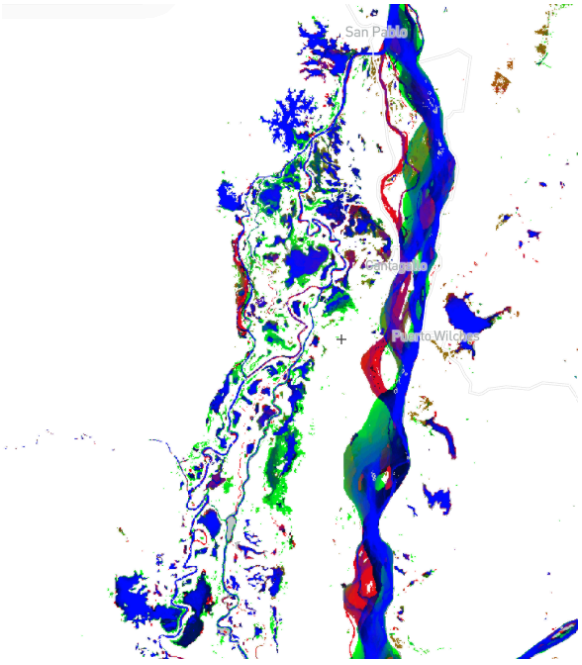




Figura 30. Ejemplo de transición de superficie de agua en Puerto Wilches, Santander (Magdalena Medio). Se ilustra una transición específica en la región, utilizando la composición de color previamente descrita.
Fuente: MapBiomas Agua (2023).

7.3. Tendencia de superficie de agua

El análisis de la tendencia de la superficie del agua fue realizado utilizando la base de datos mensual de agua.

7.3.1. Modelo armónico

Para describir la estacionalidad y la tendencia se ajusta el modelo armónico descrito por Shumway y Stoffer (2006) (Figura 29). Sea $x_1, x_2, \ldots, x_n$ la serie de superficie de agua mensual, con $t \in \{1, \ldots, n\}$, donde $t = 1$ es el primer mes de la serie y $t = n$ el último. El valor de n depende de la colección: es el número total de meses de la serie (12 por cada año). El valor ajustado es:

$$\hat{x}_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{12}\right) + \beta_3 \sin\left(\frac{2\pi t}{12}\right)$$

Los coeficientes β_0 a β_3 se estiman por mínimos cuadrados ordinarios. β_1 recoge la tendencia lineal, y β_2 y β_3 la amplitud y la fase del ciclo anual

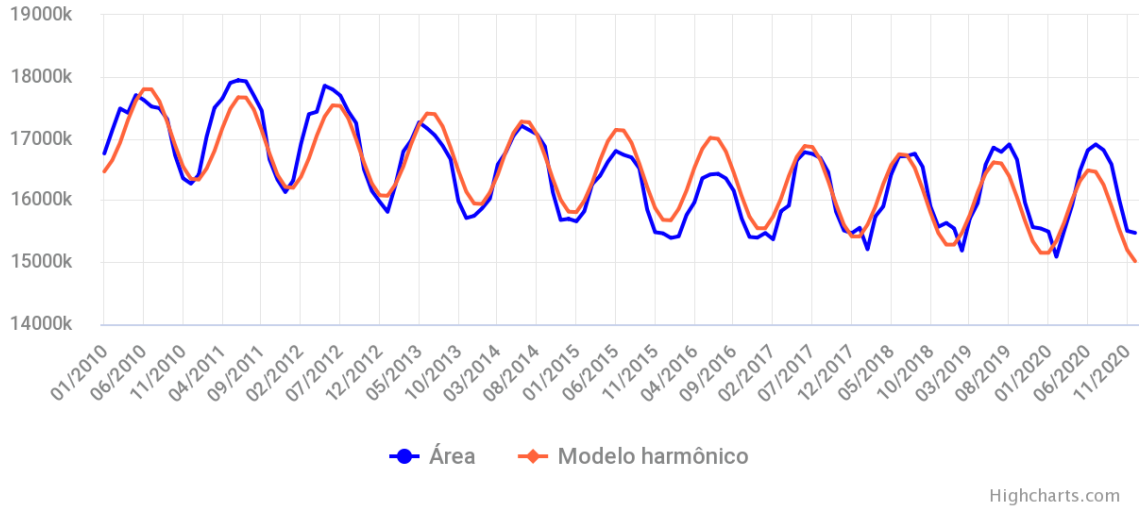
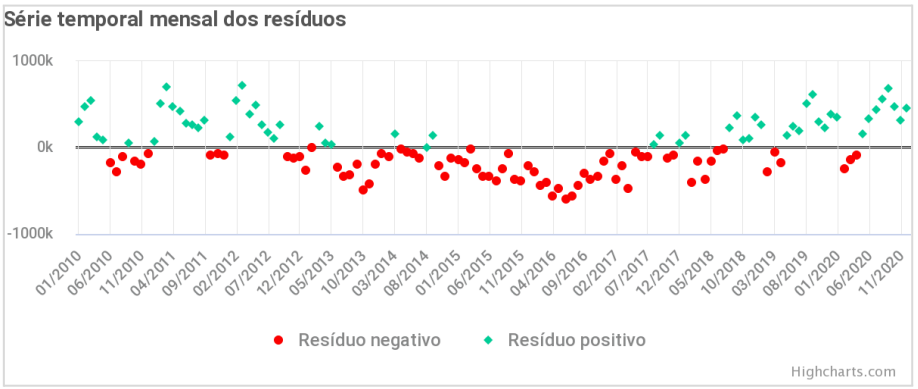


Figura 31. Ejemplo de ajuste de serie armónica a los resultados de superficie de agua mapeada mensualmente. La línea azul corresponde a la superficie de agua mapeada, la línea roja indica el ajuste del modelo armónico.

Fuente: MapBiomas Agua (2023).

7.3.2. Diferencias entre el modelo y los datos observados

La diferencia entre la superficie observada y la ajustada por el modelo señala los meses en que el agua estuvo claramente por encima o por debajo de lo esperado (Figura 32).



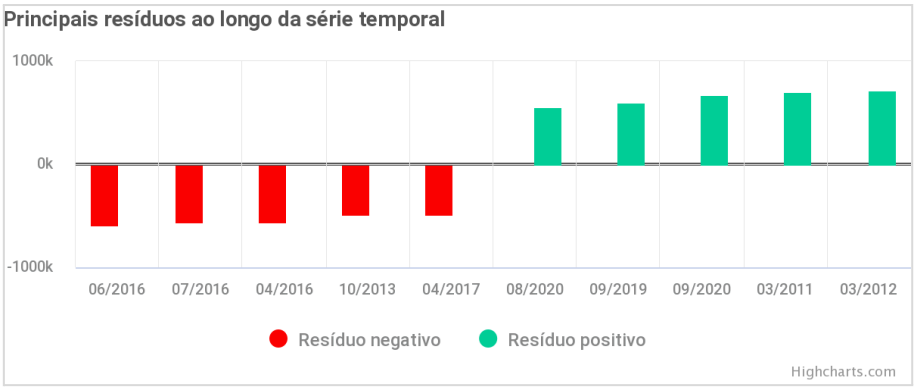


Figura 32. Ejemplo de las diferencias entre el modelo ajustado y los datos observados. Los puntos y barras verdes indican valores de aumento, mientras que los puntos y barras rojas indican valores de disminución en relación a lo esperado por el modelo armónico.
Fuente: MapBiomas Agua (2023)

Para cada mes t se calcula el residuo, es decir, la diferencia entre la superficie de agua mapeada y la esperada por el modelo armónico (Proyecto MapBiomas, 2025):

$$r_t = x_t - \hat{x}_t$$

El modelo representa el comportamiento "esperado" de la serie: un nivel medio, una tendencia lineal y un ciclo anual regular. El residuo mide cuánto se aparta cada mes de ese comportamiento:

- **Residuo positivo (verde en la Figura 32):** el mes tuvo más superficie de agua de la esperada para esa época del año, como ocurre en temporadas de lluvias más intensas o inundaciones extraordinarias.
- **Residuo negativo (rojo):** el mes tuvo menos agua de la esperada, como ocurre en sequías o temporadas secas más prolongadas.
- **Residuo cercano a cero:** el mes se comportó según el patrón estacional y la tendencia de la serie.

Como el modelo ya descuenta la estacionalidad, el residuo permite comparar meses distintos en igualdad de condiciones. Por ejemplo, un abril con poca agua puede ser anómalo aunque tenga más superficie que un febrero típico. Los residuos se expresan en hectáreas y, para comparar unidades territoriales de distinto tamaño, pueden expresarse también como porcentaje del valor esperado. Las rachas de residuos del mismo signo durante varios meses consecutivos indican periodos húmedos o secos persistentes, que el modelo armónico, por ser regular, no reproduce.

Este análisis es **descriptivo**, señala cuándo la superficie de agua se apartó de lo esperado, pero no atribuye la causa. Además, en los meses con pocas observaciones válidas o completados por el llenado temporal (secciones 4.2 y 5.5.2), un residuo grande puede reflejar la falta de datos y no un cambio real del agua.

7.3.3. Prueba estacional de Mann-Kendall

Para detectar tendencias monótonas crecientes o decrecientes se usa la prueba estacional de Mann-Kendall (Hirsch et al., 1982; Hirsch y Slack, 1984; Gilbert, 1987; Helsel y Hirsch, 1992; Morell y Fried, 2009). Es una prueba no paramétrica, por lo que no exige que los datos sigan una distribución normal.

Para una serie $x_1, \ldots, x_n$, cada valor se compara con todos los posteriores:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_k), \qquad \operatorname{sgn}(d) = \begin{cases} 1 & d > 0 \\ 0 & d = 0 \\ -1 & d < 0 \end{cases}$$

En términos sencillos, S compara cada mes con todos los meses posteriores: suma 1 cada vez que el valor posterior es mayor, resta 1 cada vez que es menor y no cuenta los empates. Por ejemplo, en la serie 10, 12, 11 hay tres pares: (10, 12) suma 1, (10, 11) suma 1 y (12, 11) resta 1, de modo que S = 1. Como solo cuenta si un valor sube o baja, y no cuánto, la prueba es robusta frente a valores extremos: un año excepcionalmente húmedo pesa lo mismo que cualquier otro aumento.

Un valor de S positivo indica una tendencia creciente, y uno negativo una tendencia decreciente. Para tener en cuenta la estacionalidad, la serie de 41 años se divide en 12 subseries, una por mes (todos los eneros, todos los febreros, etc.). S se calcula en cada una y se suma (Helsel y Hirsch, 1992):

$$S = \sum_{g=1}^{12} S_g, \qquad \operatorname{Var}(S) = \sum_{g=1}^{12} \frac{n_g(n_g - 1)(2n_g + 5)}{18}$$

donde *n_g* es el número de años con dato en el mes g. La significancia se evalúa con el estadístico Z, comparado con la distribución normal estándar:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

Si no hubiera tendencia, los aumentos y las disminuciones se compensarían y S oscilaría alrededor de 0. Var(S) indica cuánto puede variar S solo por azar, y Z expresa S en unidades de esa variabilidad. El ±1 del numerador es una corrección de continuidad, necesaria porque S toma solo valores enteros. Cuando hay empates, la varianza se ajusta (Helsel y Hirsch, 1992). Con un nivel de significancia α = 0,05, la tendencia se considera significativa si |Z| > 1,96, es decir, si la probabilidad de obtener un S tan alejado de 0 sin tendencia real es menor al 5 %. La Figura 33 muestra un ejemplo de resultado.

$$\beta_{Sen} = \text{mediana}\left(\frac{x_{g,j} - x_{g,i}}{j - i}\right), \quad i < j, \quad g = 1, \ldots, 12$$

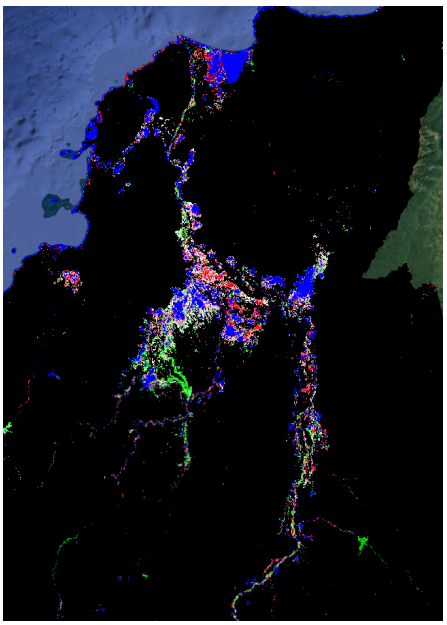


Figura 33. Tendencias de la superficie del agua según la prueba estacional de Mann-Kendall. Rojo: disminución; verde: aumentó; blanco y azul: estabilidad. Solo se muestran valores significativos. Fuente: elaboración propia.

Interpretación del resultado

Para cada unidad de análisis la prueba arroja uno de tres resultados (Figura 33):

- **Aumento significativo:** al comparar cada mes con el mismo mes de otros años, la superficie de agua tiende a crecer de forma sostenida.
- **Disminución significativa:** la superficie tiende a reducirse de forma sostenida.
- **Sin tendencia significativa:** no se detecta una dirección persistente. Esto no significa necesariamente que el agua se mantenga estable: puede haber cambios que la variabilidad entre años impide distinguir.

Tres rasgos orientan la lectura. La tendencia es **monótona, no lineal**: la prueba detecta una dirección persistente aunque el cambio sea irregular. Es **estacional**: al comparar enero con enero y julio con julio, el ciclo de lluvias no se confunde con una tendencia. Y es **estadística**: la significancia indica que la dirección probablemente no se debe al azar, pero no dice cuánto cambió el agua ni por qué.

Al interpretarla conviene tener en cuenta cuatro limitaciones:

- **Autocorrelación:** si los años consecutivos se parecen entre sí, la prueba puede sobrestimar la significancia. Hirsch y Slack (1984) proponen una versión corregida.
- **Periodo completo:** una tendencia calculada para 1985–2025 puede ocultar cambios de dirección dentro de la serie.
- **Calidad de los primeros años:** los mosaicos con pocas observaciones (sección 4.2) pueden inducir tendencias aparentes.
- **Causas:** la prueba describe el cambio, no lo atribuye a clima, uso del suelo u otros factores.

Utilidad de la información

La prueba estacional de Mann-Kendall es el último paso descriptivo de la cadena de análisis, y cada paso responde una pregunta distinta:

1. El modelo armónico describe el comportamiento esperado: nivel, ciclo anual y tendencia lineal.
2. Los residuos muestran cuándo el agua se apartó de lo esperado.
3. Mann-Kendall indica si hay una dirección persistente de cambio, ya descontada la estacionalidad.
4. La pendiente de Sen indica cuántas hectáreas por año se ganan o se pierden.

Así, 41 años de datos mensuales se resumen en un indicador claro para cada cuenca, municipio, área protegida o territorio indígena: ¿la superficie de agua aumenta, disminuye o no muestra una tendencia clara? Este indicador permite identificar las unidades con disminuciones

significativas para priorizar el seguimiento y la verificación en campo. También aporta insumos para la ordenación de cuencas, la gestión del riesgo y la conservación de humedales, y sirve de línea base para comparar colecciones futuras. Explicar las causas de una tendencia requiere análisis adicionales que quedan fuera del alcance de esta ATBD.

8. Limitaciones y recomendaciones de uso

- **Tamaño mínimo:** los cuerpos de agua y ríos más estrechos que la resolución de 30 m pueden no detectarse.
- **Inicio de la serie:** antes de 2000 hay menos escenas Landsat válidas, sobre todo en zonas nubosas, por lo que esos años son menos robustos. En 1988 y 1992 los mosaicos cubren alrededor de un tercio del territorio (sección 4.2).
- **Nubosidad:** en el Pacífico y la Amazonía muchos meses dependen del llenado temporal.
- **Agua no visible:** el agua bajo dosel forestal o bajo vegetación flotante densa no se detecta de forma confiable.
- **Comparación entre colecciones:** las cifras de distintas colecciones no son directamente comparables.
- **Exactitud:** hasta la evaluación de 2027, los resultados no tienen una medida de error asociada.

9. Perspectivas

Las próximas colecciones podrían combinar Sentinel-1 y Sentinel-2 para mejorar la resolución espacial y la frecuencia de observación. Ese par no resuelve, la detección del agua bajo dosel forestal. Para mapearla se requiere radar de banda L, como ALOS PALSAR o NISAR, cuya señal penetra el dosel; en Colombia ya se ha usado ALOS PALSAR para mapear zonas inundadas (Quiñones et al., 2016). Su incorporación dependerá de la disponibilidad de esos datos y del acceso a ellos. También prevén la evaluación de exactitud de 2027 y la publicación del repositorio de código.

10. Referencias

Achanta, R., & Süsstrunk, S. (2017). Superpixels and polygons using simple non-iterative clustering. En Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 4651–4660). https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.520

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2024). Proyectos licenciados: Sector energía y embalses [Conjunto de datos]. Datos Abiertos ANLA / Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). https://datosabiertos-anla.hub.arcgis.com/

Banco Interamericano de Desarrollo, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Departamento Nacional de Planeación. (2012). Valoración de daños y pérdidas: Ola invernal en Colombia 2010–2011. https://www.cepal.org/es/publicaciones/37958-valoracion-danos-perdidas-ola-invernal-colombia-2010-2011

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45, 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Cowardin, L. M., Carter, V., Golet, F. C., & LaRoe, E. T. (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service. https://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS4420

Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J., & van de Giesen, N. (2016). Earth's surface water change over the past 30 years. Nature Climate Change, 6, 810–813. https://doi.org/10.1038/nclimate3111

Donchyts, G., Winsemius, H., Schellekens, J., Erickson, T., Gao, H., Savenije, H., & van de Giesen, N. (2016). *Global 30m Height Above the Nearest Drainage (HAND)* [Conjunto de datos]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.571880

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 140, 23–35. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029

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(Suplemento 1), 44–62. https://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/409

Gilbert, R. O. (1987). Statistical methods for environmental pollution monitoring. Van Nostrand Reinhold. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1197046/m2/1/high_res_d/7037501.pdf

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

Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (1992). Statistical methods in water resources (Studies in Environmental Science, Vol. 49). Elsevier. https://web.iitd.ac.in/~arunku/files/CEL899_Y13/Statistical%20methods%20in%20water%20resources_Helsel.pdf

Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resources Research, 18(1), 107–121. https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107

Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. Water Resources Research, 20(6), 727–732. https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2023). Resumen Estudio Nacional del Agua 2022. https://ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/publicaciones/resumen_ejecutivo_estudio_nacional_del_agua_2022.pdf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2016–2022). Cartografía Básica Digital Integrada de Colombia: Drenajes sencillos y dobles [Conjunto de datos]. Portal de Datos Abiertos IGAC. https://geoportal.igac.gov.co/

MapBiomas. (2023). MapBiomas Agua – Colección 1 de la serie anual de mapas de superficie de agua de Amazonía [Conjunto de datos]. MapBiomas Amazonía. https://amazonia.mapbiomas.org/

MapBiomas Colombia. (2025). Colección 4 de la serie anual de mapas de cobertura y uso del suelo de Colombia [Conjunto de datos]. https://colombia.mapbiomas.org/

Morell, O., & Fried, R. (2009). On nonparametric tests for trend detection in seasonal time series. En B. Schipp & W. Krämer (Eds.), Statistical inference, econometric analysis and matrix algebra (pp. 19–39). Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2121-5_2

NASA Jet Propulsion Laboratory. (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second (Versión 3.0) [Conjunto de datos]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL1.003

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 540(7633), 418–422. https://doi.org/10.1038/nature20584

Proyecto MapBiomas. (2025). ATBD – Algorithm Theoretical Basis Document: MapBiomas Water, Collection 4, Version 1 [Documento técnico]. https://doi.org/10.58053/MapBiomas/HSR3BE

Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada. (2025). Base de datos geográfica raisg_base_N [Conjunto de datos]. https://geo2.socioambiental.org/raisg/rest/services/raisg/raisg_base_N/MapServer

Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. Remote Sensing of Environment, 112(9), 3469–3481. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018

Schmidt, A., & Van der Sluis, T. (2021). Contribution of remote sensing techniques for monitoring Natura 2000 sites. En Improving the availability of data and information on species, habitats and sites (pp. 41–67). Wageningen Environmental Research. https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2021/A2_Remote-sensing-techniques.pdf

Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2006). Time series analysis and its applications: With R examples (2nd ed.). Springer. https://sistemas.fciencias.unam.mx/~ediaz/Cursos/Estadistica3/Libros/Time%20Series%20Analysis%20and%20Its%20Applications.pdf

Souza, C. M., Jr., Kirchhoff, F. T., Oliveira, B. C., Ribeiro, J. G., & Sales, M. H. (2019). Long-term annual surface water change in the Brazilian Amazon biome: Potential links with deforestation, infrastructure development and climate change. Water, 11(3), Article 566. https://doi.org/10.3390/w11030566

Szabó, S., Gácsi, Z., & Balázs, B. (2016). Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. Landscape & Environment, 10(3–4), 194–202. https://doi.org/10.21120/LE/10/3-4/13

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179