

Gaia Amazonas

RAISG
RED AMAZÓNICA DE INFORMACIÓN SOCIOAMBIENTAL GEORREFERENCIADA

Documento de base teórica sobre algoritmos (ATBD)

Apéndice - Agua
Mapbiomas Agua - Colombia
Colección 4, Versión 1
2026

Coordinación del proyecto
Adriana Rojas Suárez

Responsable técnico
John Aguilar

Desarrollo
Emanuel Valero

Equipo de especialistas

Catalina Pacheco
Nicolle Melo
Camila García
https://docs.google.com/presentation/d/1GNuf6AosThjuLmXotmWeImgC84MnCjYKhc9lzdAdxq4/edit?slide=id.g3f3cca7d07e_0_0#slide=id.g3f3cca7d07e_0_0

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/

Tabla de contenido

1. Introducción 4
    1.1. Alcance y contenido del documento 4
    1.2. Descripción General 4
    1.4. Ciencia y aplicaciones clave 6
2 Información general y antecedentes 6
    2.1. Contexto e información clave 6
    2.2. Perspectiva histórica: mapas existentes e iniciativas cartográficas 7
3 Metodología 7
    3.1. Imágenes Landsat 7
    3.2. Regionalización 8
    3.3. Algoritmo para la Detección de Superficies de Agua 8
        3.3.1. Análisis de mezcla espectral 9
        3.3.2. Metodología de clasificación 9
        3.3.3. Post-clasificación 12
    3.4. Categorización de cuerpos de agua 15
        3.4.1. Leyenda 16
4 Colección de mapas y análisis 21
    4.1. Área de agua superficial 21
    4.2. Transiciones de superficie de agua 21
    4.3. Tendencia de superficie de agua 23
        4.3.1 Ajuste de un modelo armónico 23
        4.3.2 Diferencias entre el modelo armónico y los datos observados 24
        4.3.3 Tendencias temporales 24
5 Referencias 27

1. Introducción

1.1. Alcance y contenido del documento

El objetivo principal de MapBiomas Agua es mapear la dinámica de agua superficial en el territorio colombiano, de forma mensual y anual desde 1985 al 2025. Adicionalmente, se incluye una sección que identifica los glaciares de Colombia, cubriendo la misma serie temporal.

Uno de los principales resultados es el conjunto de mapas con datos anuales de la superficie de agua, incorporados parcialmente como un tema transversal a la Colección 4 de la MapBiomas Colombia, para reforzar la integración de los mapas de cobertura y uso del suelo.

Más allá de la integración con la Colección 4 de cobertura y uso, otras aplicaciones producidas por la iniciativa MapBiomas Agua es la publicación del conjunto de datos, que están disponibles públicamente en una plataforma web para mejorar la gestión y el uso de los recursos hídricos en toda la Panamazonía.

La finalidad de este Documento Base Teórico de Algoritmos (ATBD, por sus siglas en inglés) es proporcionar a los usuarios una guía que permita comprender los pasos metodológicos para producir los datos anuales de la superficie de agua en Colombia Para el caso de los glaciares, los pasos metodológicos están descritos por Turpo *et al.* (2022).

1.2. Descripción General

La iniciativa MapBiomas Agua surge de un estudio previo realizado por Imazon y WWF-Brasil en el bioma amazónico brasileño, ampliado a la cuenca del Alto Paraguay, en el bioma Chaco, publicado hace 6 años (Souza *et al.* 2019). Este estudio mostró la posibilidad de mejorar la capacidad de la Iniciativa MapBiomas para detectar y monitorear la dinámica del agua superficial de los biomas brasileños. A partir de este contexto, el grupo de trabajo de MapBiomas Agua expandió el mismo enfoque y metodología a todo el territorio brasileño.

En 2022, gracias a la alianza entre MapBiomas y la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG), se decidió adaptar, ampliar y aplicar la metodología de MapBiomas Agua en los países amazónicos (Figura 1), con el objetivo de comprender la dinámica del agua en los diversos biomas de la región. Como resultado, en septiembre de 2023 se lanzó la primera colección de mapas de agua superficial para la Panamazonía y con esto, nacen las iniciativas respectivas de cada país, incluyendo MapBiomas Agua Colombia.



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

La metodología utilizada para mapear y monitorear el agua superficial en Colombia se fundamenta en la clasificación supervisada de imágenes satelitales provenientes de Landsat (5, 7, 8 y 9). Los resultados obtenidos permiten realizar un análisis espacial detallado de los cuerpos de agua superficial, facilitando la comprensión de los cambios ocurridos en los últimos 40 años, ya sea por impactos antropogénicos o por los posibles efectos de la variabilidad y el cambio climático.

Para el procesamiento de los datos, se empleó la plataforma Google Earth Engine, lo que permitió reconstruir una serie temporal mensual sobre la dinámica del agua superficial en Colombia entre 1985 y 2025. Además, todos los cuerpos de agua identificados fueron clasificados en categorías naturales y antrópicas. Los principales resultados relacionados con el mapeo del agua superficial, así como las transiciones y tendencias temporales, fueron

integrados en un panel interactivo dentro de la plataforma web de MapBiomas Agua, facilitando el acceso y análisis por parte de los usuarios finales.

Con la actualización de esta plataforma y el lanzamiento de la Colección 4, la iniciativa MapBiomas Agua Colombia planea capacitar a los usuarios finales en su uso, incluyendo a representantes de la academia, el sector privado y el gobierno. De este modo, la disponibilidad de información confiable sobre los recursos hídricos de la nación se convierte en una herramienta esencial para los tomadores de decisiones, permitiendo priorizar acciones orientadas a proteger, restaurar y gestionar de manera sostenible el uso del agua y los ecosistemas de agua dulce.

1.4. Ciencia y aplicaciones clave

El conjunto de datos sobre la dinámica de los cuerpos de agua superficiales, ayuda a una mejor comprensión de los sistemas acuáticos y su interacción con otros componentes del ambiente, siendo crucial para la toma de decisiones y aporta significativamente a la gestión de los recursos hídricos con enfoque en el desarrollo sostenible.

La información sobre el mapeo de agua superficial puede apoyar en la planificación territorial integrada, monitoreo de los objetivos de desarrollo sostenible, iniciativas de gestión sostenible de agua, monitoreo de las concesiones de agua/pequeñas represas, apreciación de la calidad de los ecosistemas de agua dulce, investigación y evaluación de cambios en cuerpos de agua y su relación con el cambio climático.

2 Información general y antecedentes

2.1. Contexto e información clave

Las condiciones de muchos ecosistemas de agua dulce se degradaron por las actividades antrópicas en las últimas décadas. Los cambios drásticos en el uso y la cobertura del suelo, la construcción de represas hidroeléctricas, la contaminación y el uso excesivo de los recursos hídricos para la producción de bienes y servicios han alterado la calidad y disponibilidad de agua en todo el mundo. Evidencia reciente muestra que las especies de agua dulce tienen tasas de extinción dos veces más altas que las terrestres (WWF, 2020). Además, las sequías extremas y las inundaciones relacionadas con el cambio climático han aumentado la presión sobre los depósitos de agua y los ecosistemas acuáticos.

Este escenario tiende a empeorar aún más, dado el aumento de la población mundial -que en 2022 sobrepasó los 8 mil millones de habitantes- y el uso de los recursos; a menos que se desarrollen estrategias integradas de gestión del agua será imposible alcanzar los objetivos globales de desarrollo sostenible. En esta perspectiva, evaluar de manera continua e histórica los cambios en la dinámica de la superficie de agua a escala continental es uno de los principales desafíos en la toma de decisiones sobre este preciado recurso (Oliveira et al, 2019).

Estos desafíos se aplican a los países amazónicos, donde existe la mayor proporción de agua per cápita del planeta, pero con una distribución y calidad no homogéneas. Ésto implica la necesidad de una toma de decisiones específicas considerando las diferentes características regionales y los efectos interconectados y acumulativos del uso de agua. Esto sólo será posible a través de datos e información detallada y consistente sobre la dinámica de la superficie de agua (MapBiomas Agua, 2023).

La novedosa metodología de mapeo de aguas superficiales adoptada por la iniciativa MapBiomas Agua ha permitido previamente identificar y cuantificar la dinámica de la superficie de agua dulce en los países amazónicos, especialmente en los humedales (Souza *et al.* 2019). Estos resultados han sido corroborados por un estudio de NASA-JPL que también apunta a una reducción del vapor de agua en la atmósfera de la cuenca amazónica (Barkhordarian *et al.*, 2019).

2.2. Perspectiva histórica: mapas existentes e iniciativas cartográficas

El uso de datos satelitales revolucionó la capacidad humana para mapear las aguas superficiales continentales y su dinámica. La combinación del acceso gratuito a los datos de Landsat vinculado con capacidades de procesamiento en la nube permitió el lanzamiento de un conjunto de datos globales de varias décadas sobre aguas superficiales:

Global Surface Water (GSW) (Donchyts *et al.* 2016, Pekel *et al.* 2016). Esta iniciativa brinda información sobre la extensión y la dinámica de agua superficial en toda la superficie de la Tierra, basándose en un análisis de más de 30 años de imágenes Landsat a nivel de píxel,con varias aplicaciones científicas y de gestión. Sin embargo, el uso directo de GSW a nivel nacional sigue siendo un desafío por las limitaciones metodológicas en la detección de agua en llanuras aluviales, humedales y pequeñas masas de agua.

MapBiomas Agua busca superar algunas de estas limitaciones adoptando el mismo enfoque general de combinar datos Landsat con capacidades de computación en la nube, pero agregando algunas innovaciones metodológicas para mejorar la detección y mapeo de aguas superficiales. En particular, la iniciativa adopta un clasificador a nivel de subpíxel de aguas superficiales (SWSC), aplicado inicialmente al bioma de la Amazonía brasileña (Souza *et al.* 2019). En las siguientes secciones se presentan detalles de esta metodología.

3 Metodología

3.1. Imágenes Landsat

El proyecto utilizó las colecciones de imágenes Landsat disponibles en la plataforma Google Earth Engine, específicamente las correspondientes a los sensores Landsat Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Operational Land Imager (OLI), a bordo de los satélites Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Landsat 9, respectivamente. Con una resolución espacial de 30 metros por píxel, se empleó la Colección 4 Nivel 1 de imágenes ortorectificadas a

la superficie (SR). Se utilizaron todas las escenas Landsat que cubren el territorio colombiano entre 1985 y 2025, filtrando a través de sus metadatos aquellas con una cobertura de nubes menor al 70%.

3.2. Regionalización.

Para la clasificación de las superficies de agua del territorio colombiano se dividió el país en áreas de trabajo de 100 x 100 km^2 registrando un total de 133 zonas trabajo como se muestra en la figura 2.

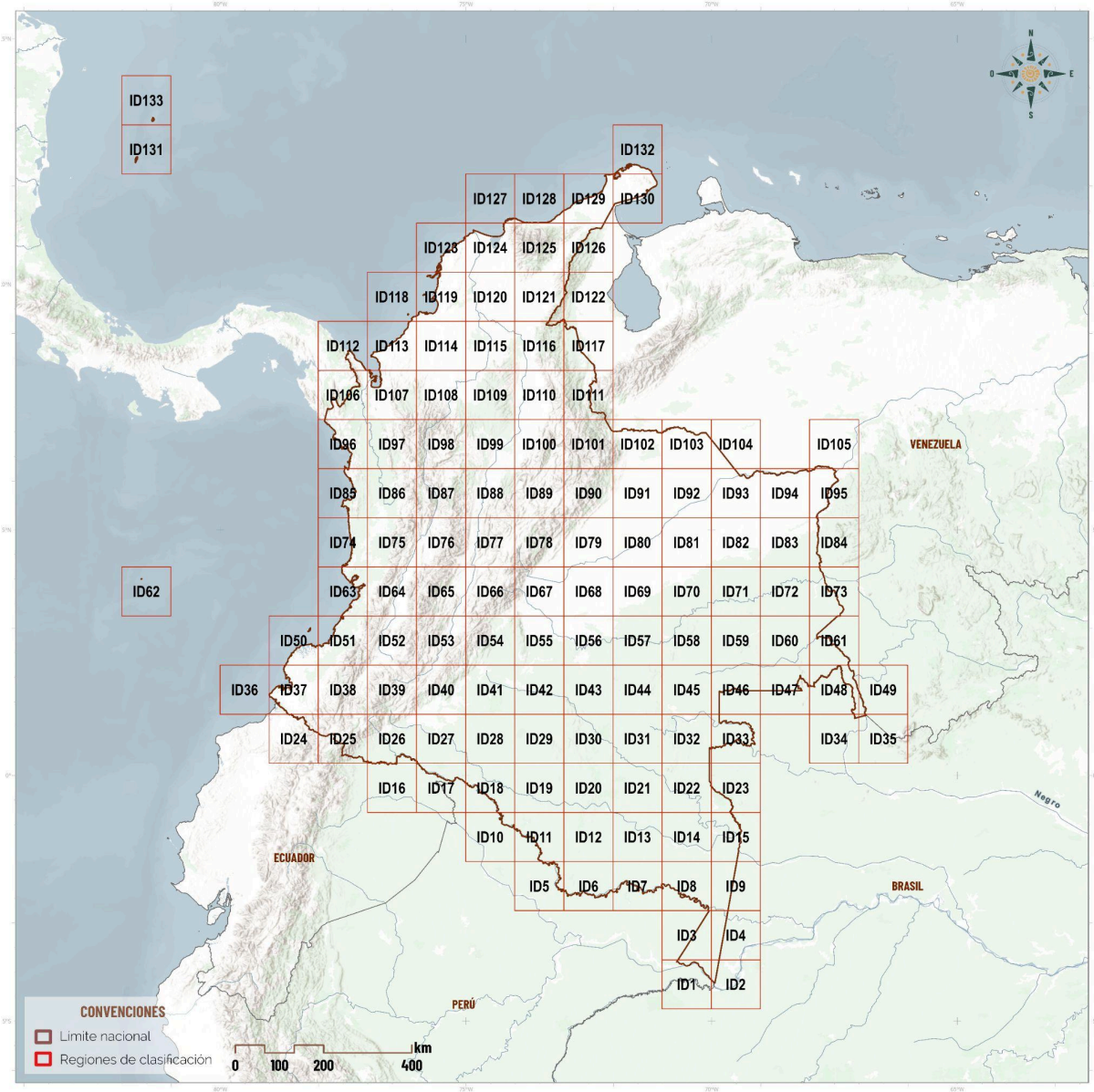


Figura 2. Regiones de clasificación. Fuente: elaboración propia.

3.3. Algoritmo para la Detección de Superficies de Agua

La metodología de clasificación se basó en el análisis de mezcla espectral (SMA, por sus siglas en inglés) aplicado sobre las imágenes Landsat descritas en el apartado anterior. Este análisis genera un conjunto de variables predictoras que funcionan como el insumo principal para introducir al modelo de clasificación supervisada Random Forests.

3.3.1. Análisis de mezcla espectral

El SMA permite estimar la composición fraccional de píxeles puros (endmembers) de vegetación verde (GV), vegetación no fotosintética (NPV), suelo (Soil), nubes (Cloud), sombra (Shade) y nieve (Snow). La información obtenida con el SMA permite hacer una detección a nivel subpixel, que es útil para caracterizar el agua superficial mezclada con otros componentes, como suelo y vegetación. Este enfoque permite superar la limitación de los clasificadores de píxeles completos y permite el mapeo de humedales, llanuras aluviales, ríos estrechos y pequeños cuerpos de agua.

En la aplicación de este modelo de SMA se utiliza una librería genérica de endmembers para las imágenes Landsat, que permite calcular el porcentaje de los componentes basándose en el algoritmo de separación espectral disponible en Google Earth Engine.

3.3.1.1. Obtención de Datos anuales de agua

Los mapas anuales de agua superficial incluyen una identificación entre agua permanente y estacional. Esta clasificación se basa en umbrales correspondientes al número de meses en que un píxel se clasifica como agua. Para el caso de agua permanente en el territorio colombiano, se consideró una frecuencia igual o mayor a 6 meses, y para agua estacional, una frecuencia entre 1 y 5 meses. La definición del umbral de agua permanente se fundamenta en la existencia de una temporada seca y otra húmeda en gran parte de las regiones del país, abarcando así todos los cuerpos de agua permanentes que son naturalmente más dinámicos.

3.3.2. Metodología de clasificación

El método general de clasificación supervisada se basa en el algoritmo Random Forest, el cual utiliza los datos obtenidos del Análisis de Mezcla Espectral (SMA) para predecir las categorías de interés. El proceso se desarrolla de la siguiente manera (Figura 3):

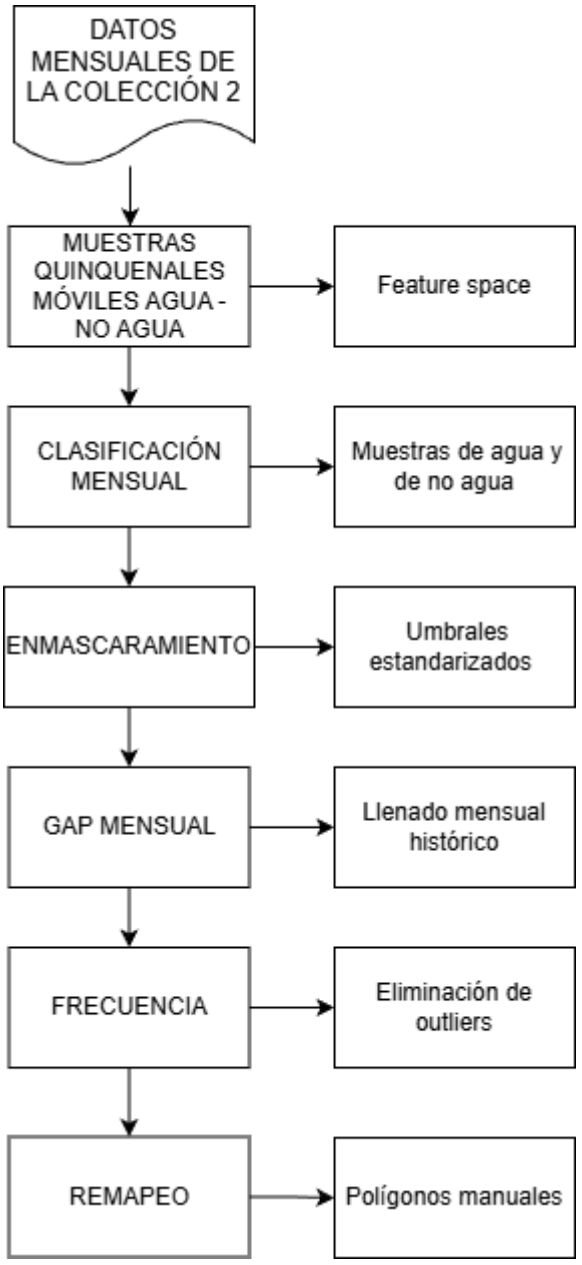


Figura 3. Flujo de clasificación. Fuente: elaboración propia.

3.3.2.1. Muestreo de puntos.

Se realiza un muestreo de puntos basado en la colección 3 de MapBiomas Agua Colombia, efectuado para cada año y mes. Esto garantiza un conjunto equilibrado de muestras representativas de áreas con cuerpos de agua (agua) y sin cuerpos de agua (no-agua) (Figura 4).

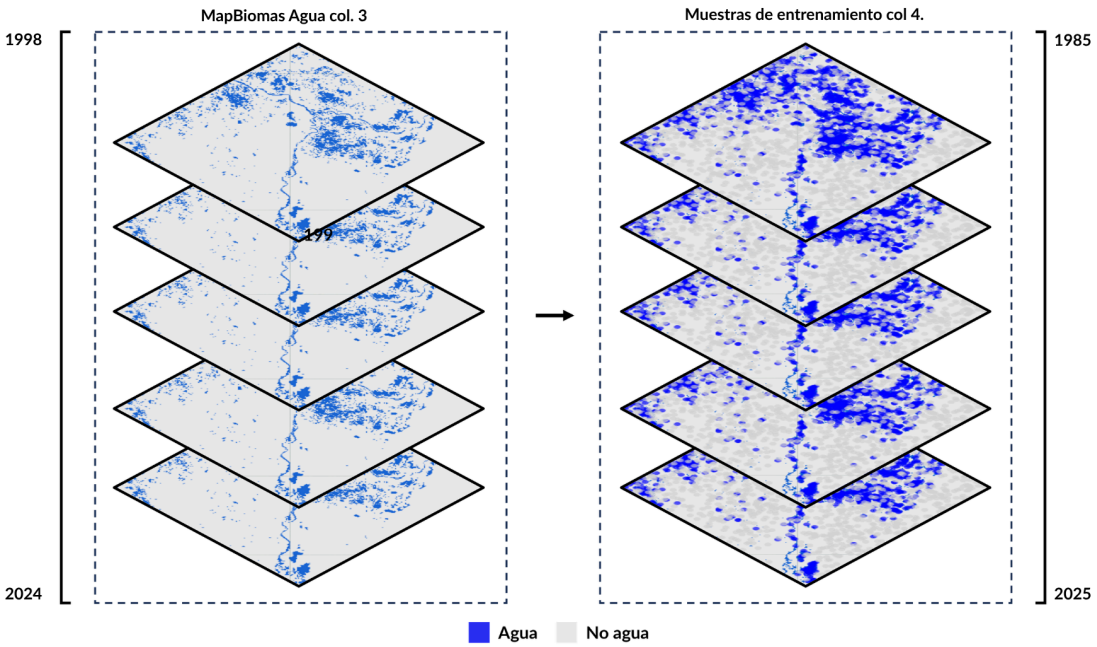


Figura 4. Generación de muestras. Fuente: elaboración propia.

3.3.2.2. Entrenamiento del clasificador

El algoritmo Random Forest se entrena utilizando las muestras estratificadas, considerando la proporción regional que ocupa cada clase (agua / no-agua). Este enfoque asegura que el modelo esté ajustado a las características específicas de cada región y periodo, mejorando la precisión de la clasificación final (Figura 5).

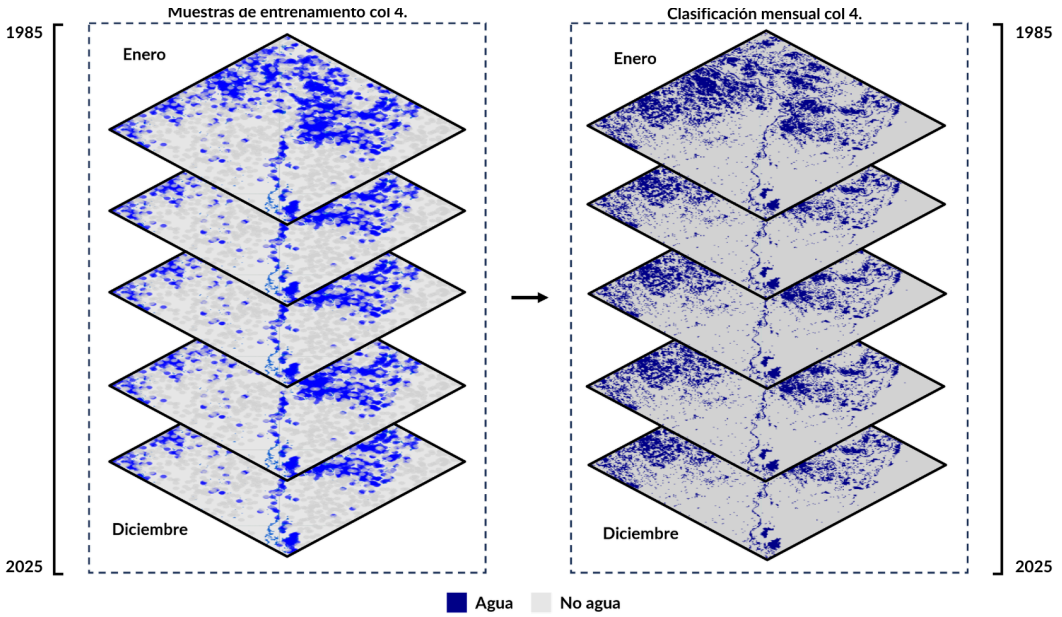


Figura 5. Proceso de clasificación. Fuente: elaboración propia.

3.3.3. Post-clasificación

El proceso de post-clasificación se implementa para mejorar la precisión y coherencia de los mapas generados, minimizando errores y asegurando la calidad de los resultados finales. Este proceso incluye:

3.3.3.1. Enmascaramiento post-clasificación utilizando índices espectrales.

Se aplican umbrales adicionales sobre índices espectrales relevantes (Tabla 1) para refinar la delimitación de las áreas clasificadas como agua y reducir posibles errores de comisión y omisión (**Figura 6**).

Tabla 1. Índices espectrales utilizados 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 de agua y reduciendo los ruidos generados por zonas urbanizadas.	(Xu, H, 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)	(Szabo, Gácsi & Balázs, 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 cuerpos de agua en zonas con cobertura vegetal.	(Schmidt y Van der Sluis 2021., 46).
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)

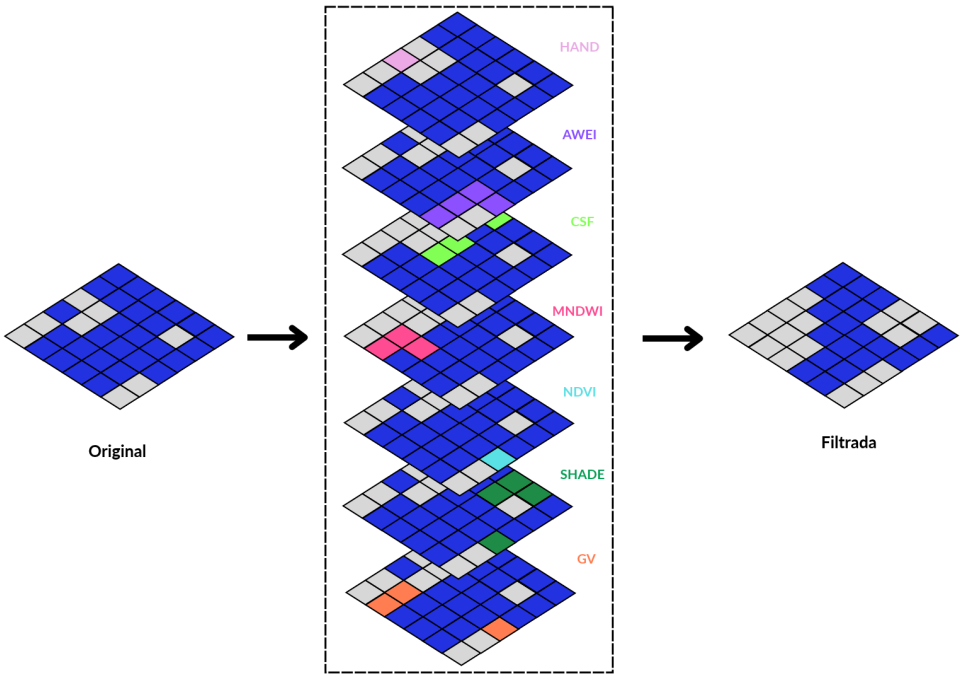


Figura 6. Funcionamiento del enmascaramiento para cada índice empleado. Fuente: elaboración propia.

3.3.3.2. Llenado de información a nivel mensual.

Se realiza una integración temporal de los resultados mensuales, asegurando la continuidad y consistencia de la información a lo largo de la serie. Este paso permite identificar y corregir posibles vacíos o inconsistencias en la detección de cuerpos de agua en meses sin información (**Figura 7**).

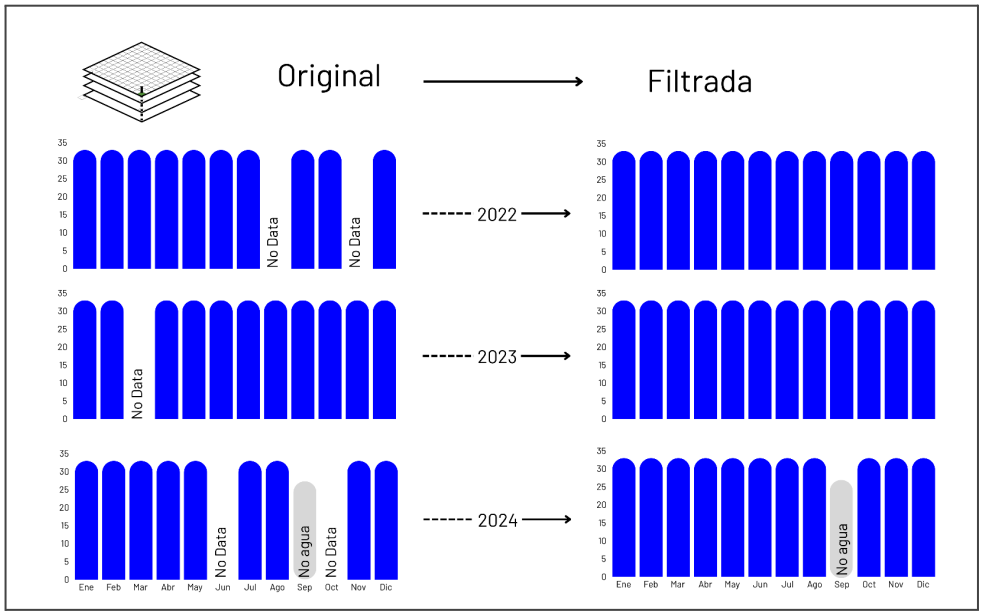


Figura 7. Funcionamiento del filtro de llenado de información mensual. Fuente: elaboración propia.

3.3.3.3. Remoción de comisiones basada en la frecuencia general de la serie temporal.

Se eliminan aquellas detecciones clasificadas como agua que presentan una baja ocurrencia a lo largo del periodo analizado, ya que suelen corresponder a errores de clasificación o a eventos atípicos no representativos de la dinámica real de los cuerpos de agua en el país (**Figura 8**).

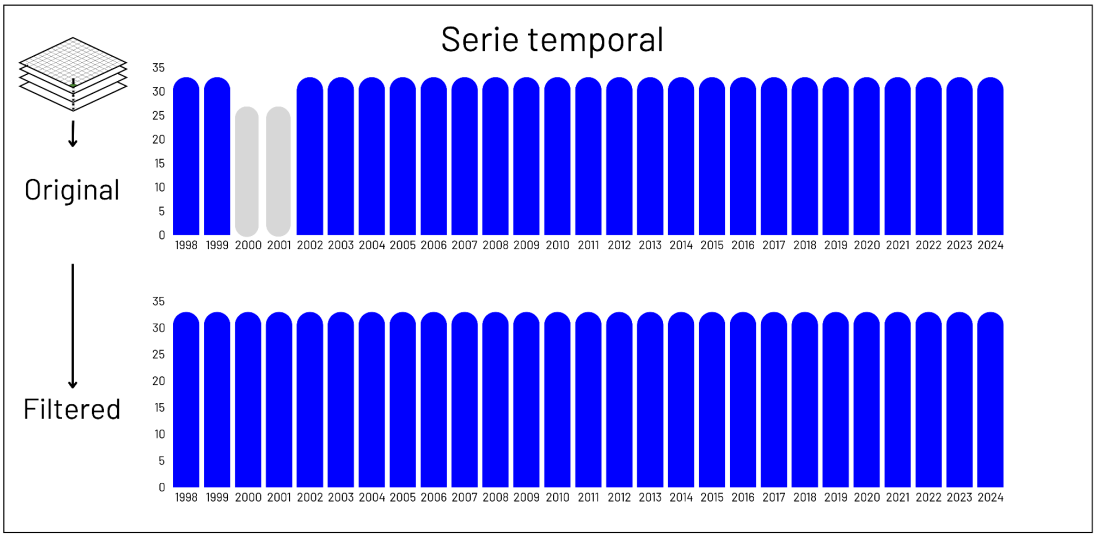


Figura 8. Funcionamiento del filtro de frecuencia. Fuente: elaboración propia.

3.3.3.4. Limpieza adicional basada en geometrías y capas de referencia.

Finalmente, se realiza una depuración espacial utilizando información auxiliar, como capas de referencia hidrológica y límites geométricos, para corregir posibles artefactos, eliminar objetos espurios y asegurar que las áreas clasificadas como agua correspondan efectivamente a cuerpos de agua reales (Figura 9).

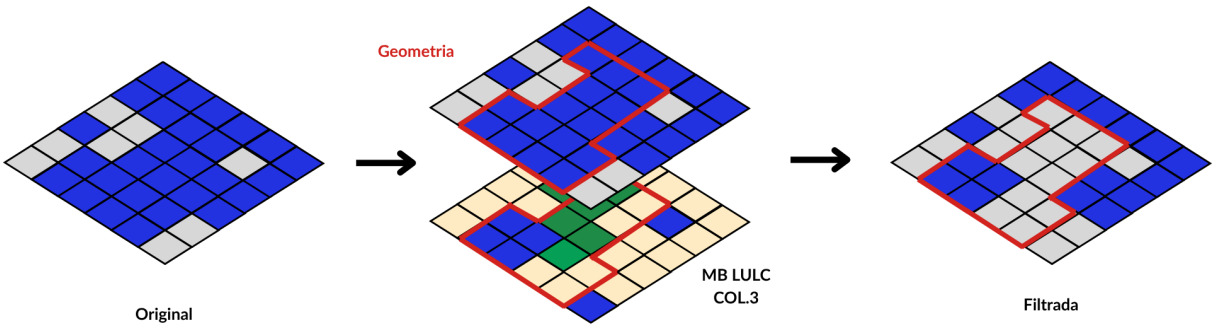


Figura 9. Funcionamiento de la limpieza adicional basada en geometrías y capas de referencia, donde se tomó la Colección 4 de MapBiomas Colombia (2025). Fuente: elaboración propia.

3.4. Categorización de cuerpos de agua TIPOS DE USO

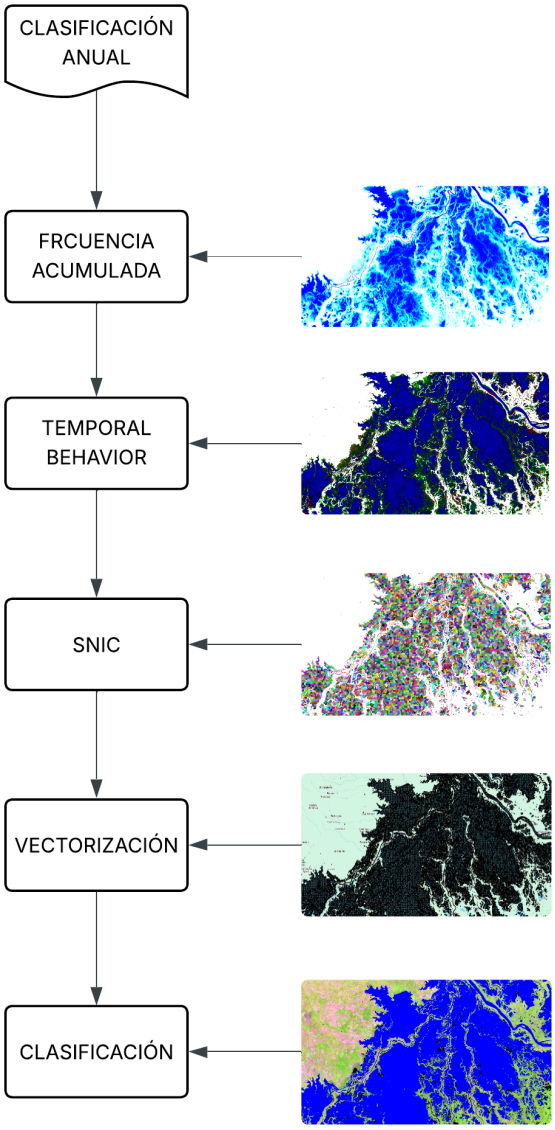


Figura 10. Metodología categorización de cuerpos de agua. Fuente: elaboración propia.

La delimitación y análisis anual de cuerpos de agua consistió en convertir los datos de frecuencia mensual en polígonos vectoriales mediante segmentación, usando la función SNIC de Google Earth Engine para generar objetos pequeños y regulares.

A cada objeto resultante (segmento) se le asignaron propiedades morfológicas, geomorfológicas y temáticas (entre ellas área, perímetro, compacidad, elongación, convexidad, extensión máxima, número de vecinos, cobertura y uso del suelo (MapBiomas Colombia), clasificación antrópica e hidroeléctrica, altura SRTM y frecuencia total media) con el fin de caracterizar su estructura y entorno.

Finalmente, estos objetos fueron clasificados con el algoritmo *Random Forest*, utilizando como insumo los cuerpos de agua con frecuencia de detección mayor o igual a seis meses y un conjunto sistemático de muestras de entrenamiento por bioma, correspondientes a las cinco

clases de naturalidad que se muestran en la tabla 2. El flujo de trabajo general se presenta en la figura 10.

3.4.1. Leyenda. OTROS ANTRÓPICOS

El mapeo de la superficie de agua se organizó en un esquema de clasificación de cuerpos de agua en seis categorías: 1) Natural, 2) Antrópico, 3) Hidroeléctricas, 4) Agua de minería, 5) Falsos positivos y 6) Acuicultura. Los falsos positivos son un subproducto de la clasificación para eliminar algunos casos de comisiones que persistían en las colecciones mensuales y anuales de superficie de agua. Un ejemplo de la clasificación se muestra en la figura 11 .

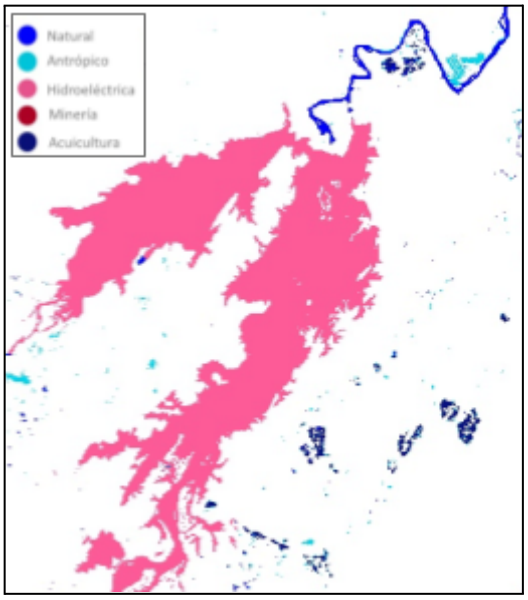


Figura 11. Ejemplo de categorías de cuerpo de agua. Fuente: elaboración propia.

La categorización de los cuerpos de agua se estructuró en un esquema jerárquico de dos niveles basado en su grado de naturalidad. En el primer nivel, los cuerpos de agua 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 cuerpos de agua presentes en el territorio. En el caso de los cuerpos de agua naturales, se incluyen ríos, lagos, lagunas y ciénagas. Por su parte, los cuerpos de agua antrópicos integran las clases asociadas a hidroeléctricas, actividades mineras, acuicultura y otros cuerpos de agua resultantes de la intervención humana (Tabla 2).

Tabla 2. Leyenda nivel 1 y nivel 2 de naturalidad para la Colección 4.0 de Map biomas Agua

NIVEL 1				NIVEL 2			
ID	**Clase nivel 1**	**Hexadecimal code**	**Color**	**ID**	**Clase nivel 2**	**Hexadecimal code**	**Color**
	Natural	0000FF			Ríos, lagos, lagunas y ciénagas	0000FF	
	Antrópico	00D7EE			Minería	BD0027	

Reservorios	00D7EE	
Hidroeléctrica	FD5A98	
Acuicultura	091182	

3.4.1.1. Natural

Ríos, lagos, lagunas y ciénagas

Incluye todos los cuerpos 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 (Figura 12).

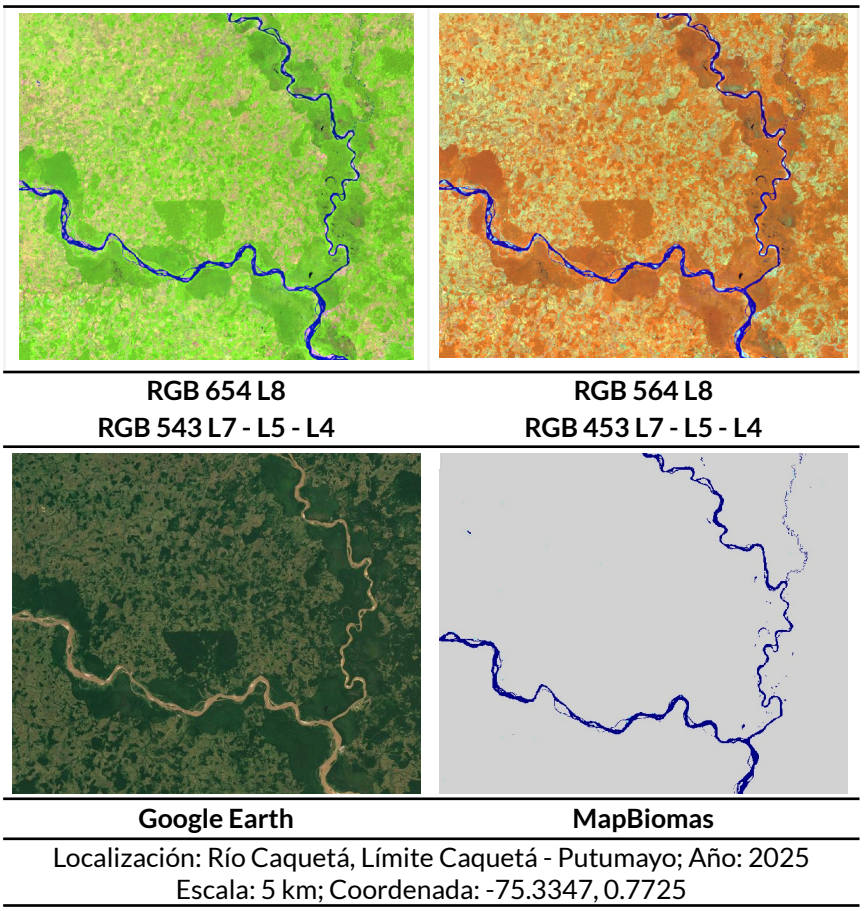
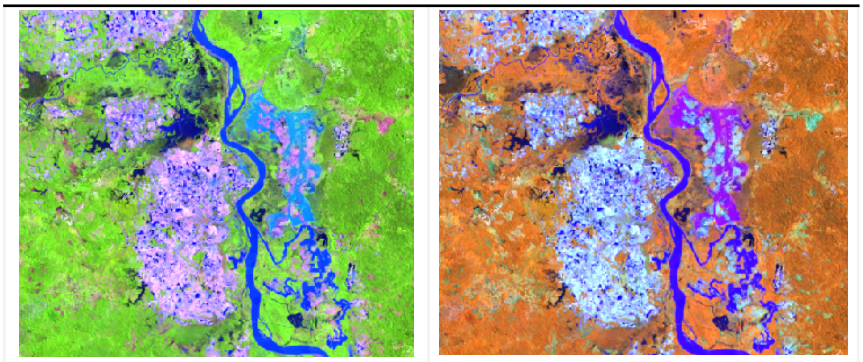


Figura 12. Respuesta espectral de la clase Ríos, lagos, lagunas y ciénagas .
Fuente: elaboración propia.

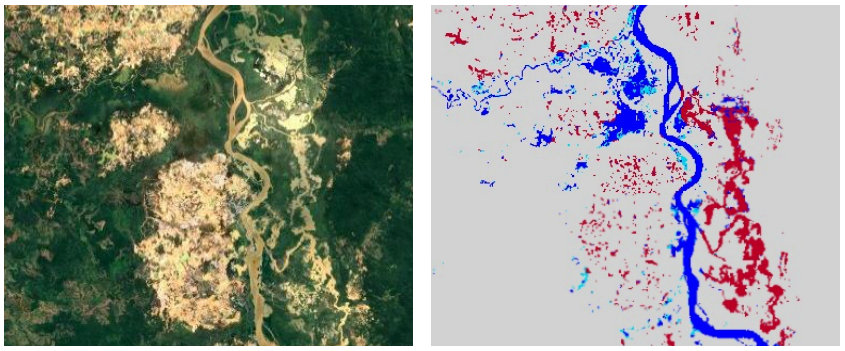
3.4.1.2. Antrópico

Minería

Cuerpos de agua asociados a actividades mineras, formados como resultado de procesos de extracción, remoción de materiales, acumulación de sedimentos o excavaciones producto de la minería (Figura 13).



RGB 654 L8 RGB 543 L7 - L5 - L4	RGB 564 L8 RGB 453 L7 - L5 - L4



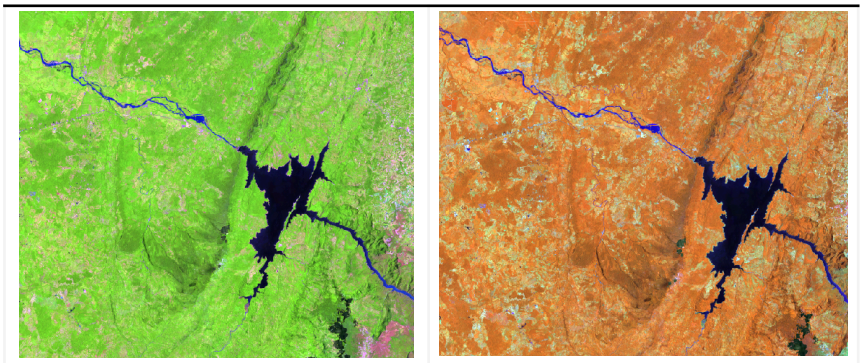
Google Earth	MapBiomas

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

Figura 13. Respuesta espectral de la clase Minería.
Fuente: elaboración propia.

Hidroeléctricas

Comprende los embalses y reservorios creados mediante la construcción de presas y muros de contención para la acumulación y regulación de caudales de grandes ríos que tienen como objeto la producción de energía hidroeléctrica (Figura 14).



RGB 654 L8	RGB 564 L8

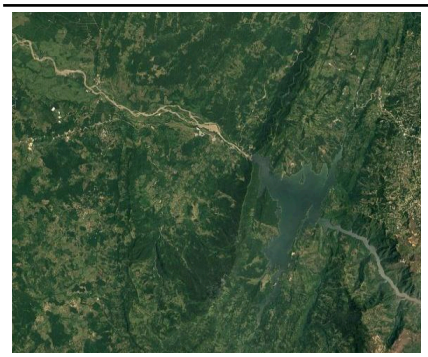
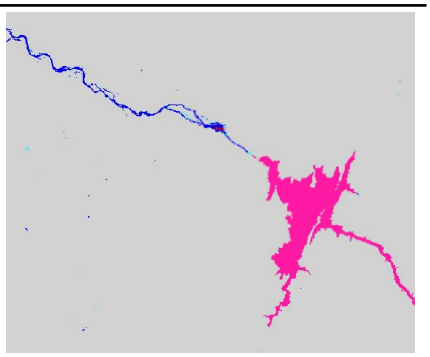
RGB 543 L7 - L5 - L4	RGB 453 L7 - L5 - L4
	
Google Earth	**MapBiomas**
Localización: Hidrosogamoso, Santander; Año: 2025; Escala: 5 km; Coordenada: -73.3614, 7.0575	

Figura 14. Respuesta espectral de la clase Hidroeléctricas. Fuente: elaboración propia.

Acuicultura

Estanques y reservorios destinados a la cría y cultivo de peces, camarones y otros crustáceos en ambientes de agua dulce o salada (Figura 15).

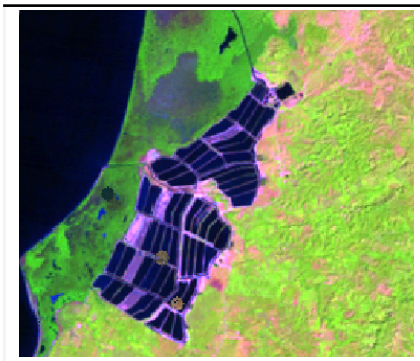
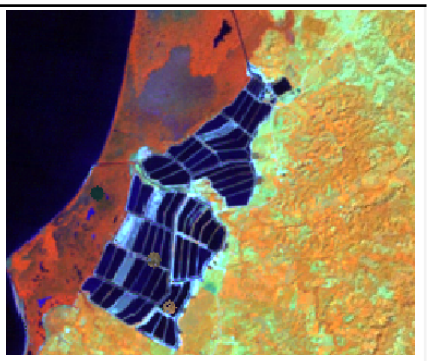
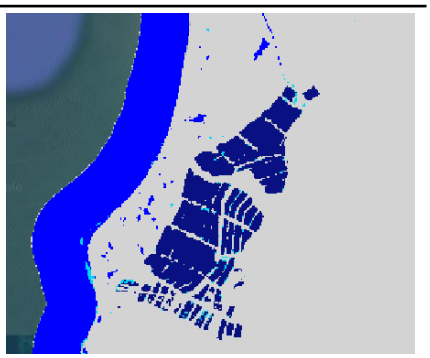
RGB 654 L8	RGB 564 L8
	
RGB 543 L7 - L5 - L4	**RGB 453 L7 - L5 - L4**
	
Google Earth	**MapBiomas**
Localización: Libertad, Sucre; Año: 2000; Escala: 1 km; Coordenada: -75.57289, 9.94051	

Figura 15. Respuesta espectral de la clase Acuicultura. Fuente: elaboración propia.

Reservorios

Otros cuerpos de agua creados o modificados por actividades humanas tales como jagüeyes, reservorios, pequeñas represas y canales (Figura 16).

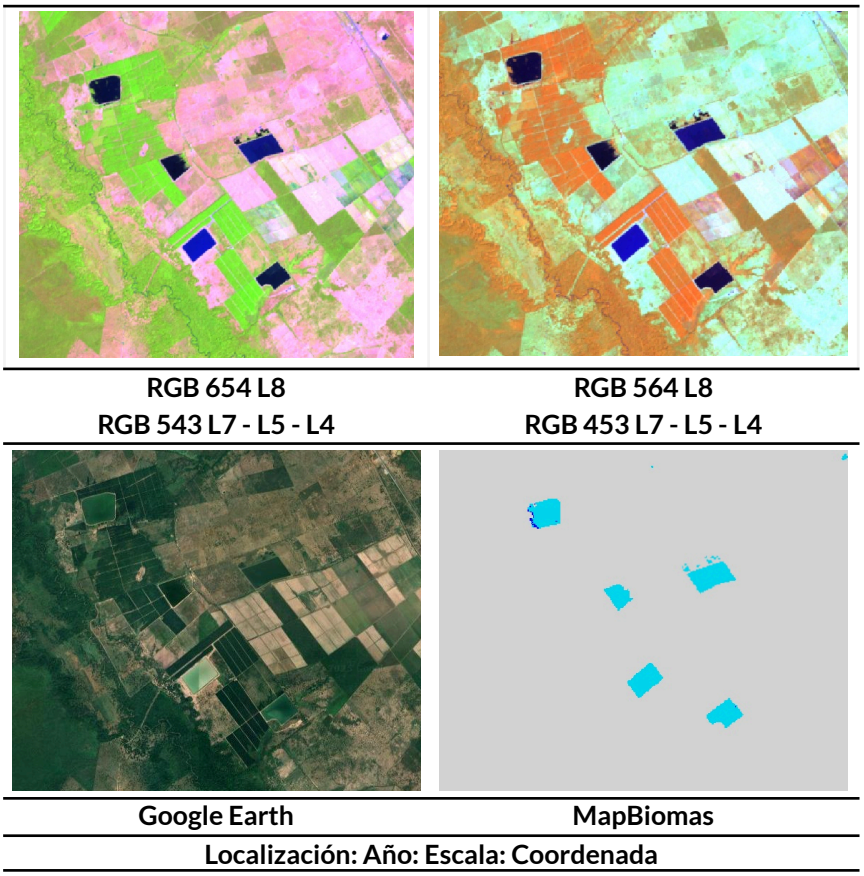


Figura 16. Respuesta espectral de la clase Otros cuerpos antrópicos. Fuente: elaboración propia.

4 Colección de mapas y análisis

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.

4.1. Área de agua superficial

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 17).

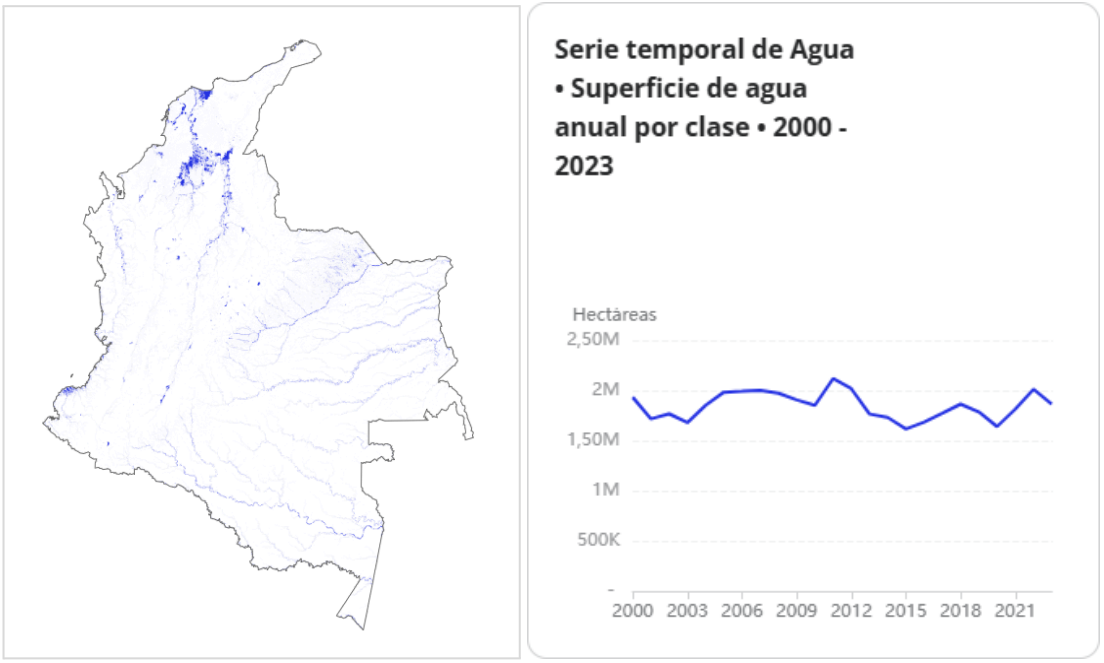


Figura 17. Ejemplo de visualización de los datos de la capa de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomas Agua.
Fuente: elaboración propia.

4.2. 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., 40 años). Se elaboró una composición de color en RGB para facilitar la visualización e identificación de estas categorías (Figura 18). 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 19).

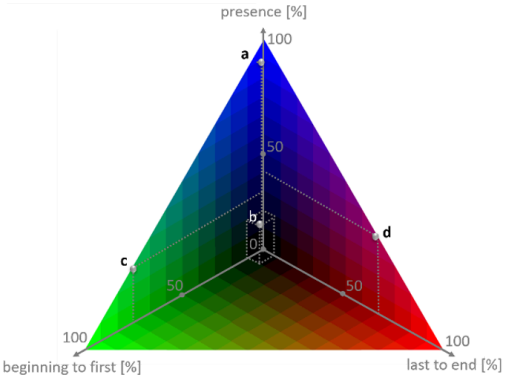


Figura 18. Dinámica de superficie de agua RGB. El color azul indica persistencia, ya que el total de años fueron clasificados como superficie de agua; verde, incrementó (los años desde el principio de la serie temporal hasta la primera clasificación); y rojo disminución. Los colores negros y oscuros indican superficies de agua esporádicas o no permanentes. Fuente: MapBiomas Agua (2023).

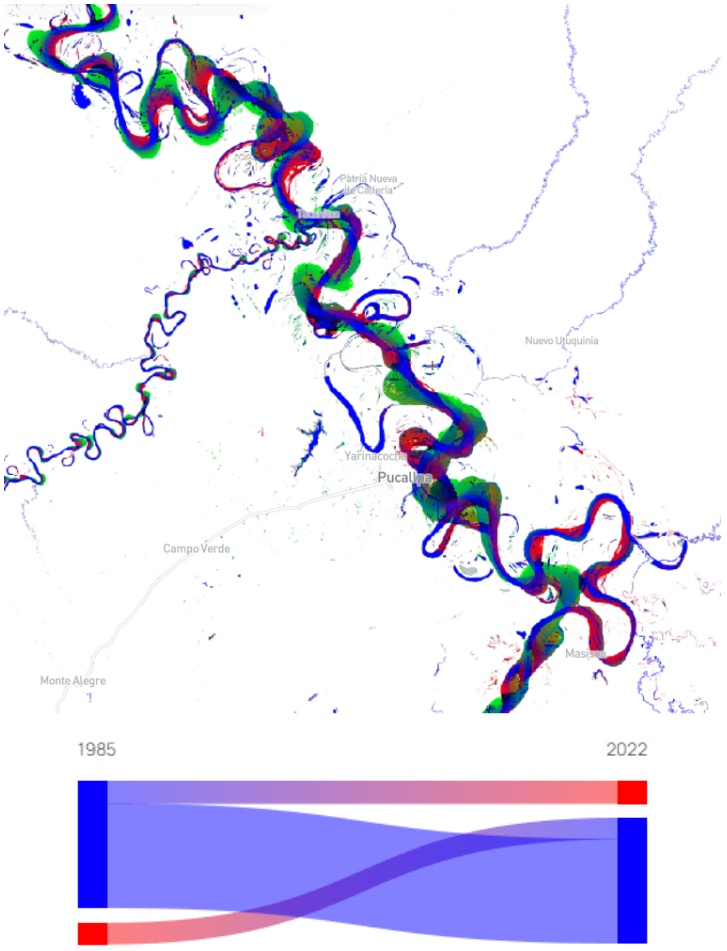


Figura 19. Ejemplo de transición de superficie de agua en Pucallpa, Ucayali, Amazonía peruana. Se ilustra una transición específica en la región, utilizando la composición de color previamente descrita. Fuente: MapBiomas Agua (2023).

4.3. Tendencia de superficie de agua

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

4.3.1 Ajuste de un modelo armónico

Para describir y probar cambios en los patrones de variación estacional, relacionados con cambios de fase, amplitud y tasa de variación, buscando patrones estacionales y posibles tendencias en referencia a los datos mensuales del mapeo de la superficie de agua para la serie temporal 1985-2025, se utilizó el modelo armónico descrito por Shumway y Stoffer (2006) (Figura 20).

Siendo $x_1, x_2 ..., x_n$ un conjunto de n datos donde x_t representa el valor del área variable de la superficie de agua en la serie de tiempo, para $t < [1,n] \in \aleph$, en el dato n = 468 (meses). Se ha calculado el valor armónico para cada elemento de la serie siguiendo la siguiente fórmula:

$$x_t = \beta_0 + \beta_1 * t + \beta_2 * \cos(2\pi * t) + \beta_3 * \sin(2\pi * t)$$

Los coeficientes estimados β_0, β_1, β_2, β_3 fueron calculados usando el método de mínimos cuadrados ordinarios. (Shumway y Stoffer, 2006).

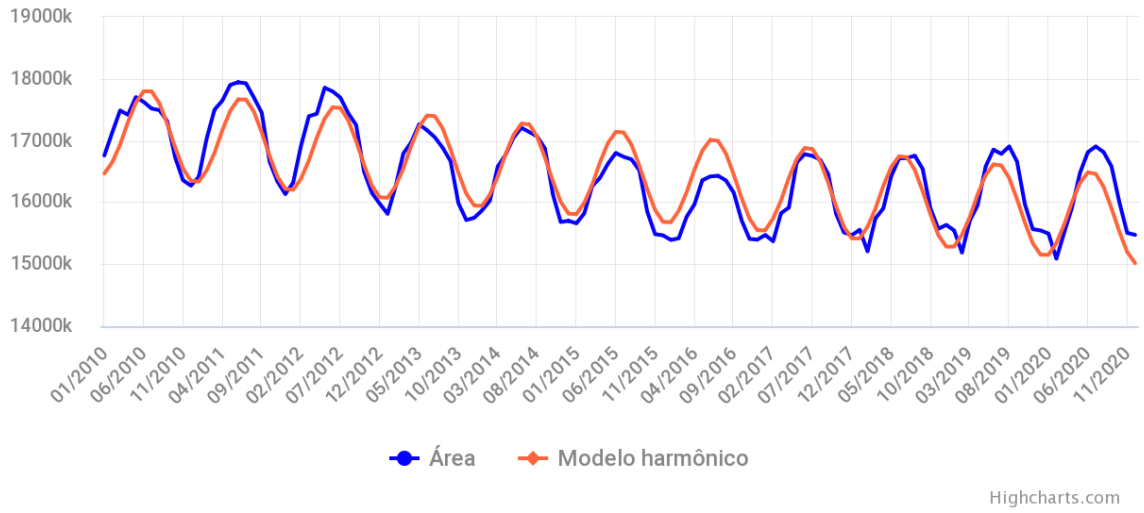


Figura 20. Ejemplo de ajuste de serie armónica a los resultados de superficie de agua mapeada mensualmente. La línea azul corresponde a la superficie de agua mapeada, la línea roja indica el ajuste del modelo armónico. Fuente: MapBiomas Agua (2023).

4.3.2 Diferencias entre el modelo armónico y los datos observados

Para detectar el comportamiento de aumento o disminución a lo largo de la serie de tiempo, se ha calculado la diferencia entre el modelo armónico y la superficie de agua mapeada. Este análisis pretende señalar con mayor claridad qué periodos mensuales presentaron salidas más intensas según lo esperado por el modelo.

4.3.3 Tendencias temporales

Se buscaron tendencias de aumento, disminución o permanencia en la superficie de agua mapeada a lo largo de la serie temporal de 1985-2025. El Ensayo se realizó utilizando la prueba estacional de Mann Kendall (MK test), que se usa para analizar los datos recopilados a lo largo del tiempo en busca de tendencias crecientes o decrecientes con comportamiento monótono en los valores del eje Y (Figura 21). No es paramétrico, por lo que no es necesario que los datos cumplan con los supuestos de normalidad, que analiza los datos en busca de tendencias monótonas en los datos estacionales (Hirsch *et al*. 1982, Hirsch *et al*. 1984, Gilbert 1987, Helsel y Hirsch 1995, Morell y Fried 2009).

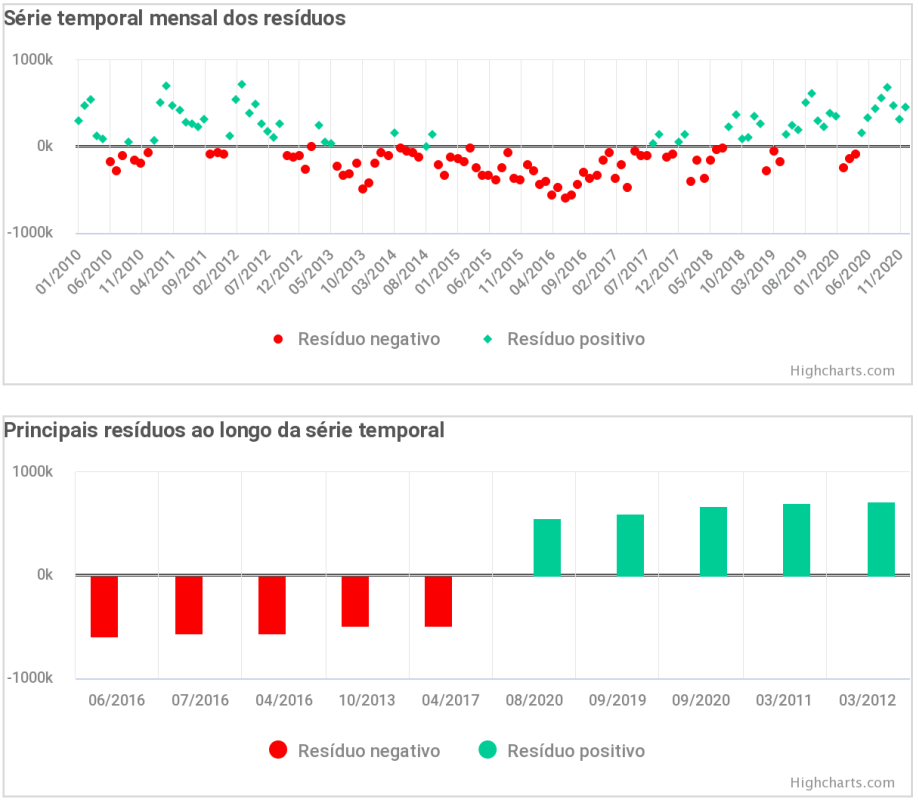


Figura 21. Ejemplo de las diferencias entre el modelo ajustado y los datos observados. Los puntos y barras verdes indican valores de aumento, mientras que los puntos y barras rojas indican valores de disminución en relación a lo esperado por el modelo armónico. Fuente: MapBiomas Agua (2023)

Para realizar la prueba sobre la serie temporal, los valores se consideran una serie temporal ordenada. Cada valor de la serie se compara con el resto de los elementos posteriores de la serie. En la estadística de Kendall se considera como 0, cuando S = 0. Si el valor de S para todo el conjunto de elementos es mayor que 0, significa que la tendencia de los datos de la serie está disminuyendo. De lo contrario, significa que la serie está aumentando.

Se consideraron los siguientes pasos para calcular la estadística de Mann-Kendall:

Siendo $x_1,x_2,....,x_n$ un conjunto de n datos donde x_j representa el valor de la variable tiempo *j* para todo $j < [1,n] \in \aleph$, entonces se calcula:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sign(x_j - x_k)$$

la función es:

$$sign(x_j - x_k) = 1 \qquad se\ x_j - x_k > 0$$
$$sign(x_j - x_k) = 1 \qquad se\ x_j - x_k = 0$$
$$sign(x_j - x_k) = -1 \qquad se\ x_j - x_k < 0$$

Cada valor añadido a S significa un aumento o una disminución del valor respecto del siguiente de la serie.

En las series temporales de datos de área para recolectar mapas de cuerpos de agua, fue necesario considerar el cálculo de Kendall para una serie con comportamiento estacional. La serie de superficies de cuerpos de agua corresponde a una serie temporal de 12 meses a lo largo de 40 años. Dada esta estructura para el cálculo de la estadística S, los datos se dividieron en 12 subconjuntos, donde el primer subconjunto corresponde a todos los valores correspondientes al mes de enero de la serie, el segundo a todos los valores correspondientes a febrero de la serie, y así sucesivamente, hasta diciembre. Entonces el valor de S será la suma de todos los S_j donde J = [1.12] (Helsel y Hirsch 1995).

$$S = \sum_{j=1}^{12} S_j$$

El valor de Kendall para cada mes se calcula como se describe anteriormente. El resultado del modelo se puede visualizar en la figura 22.

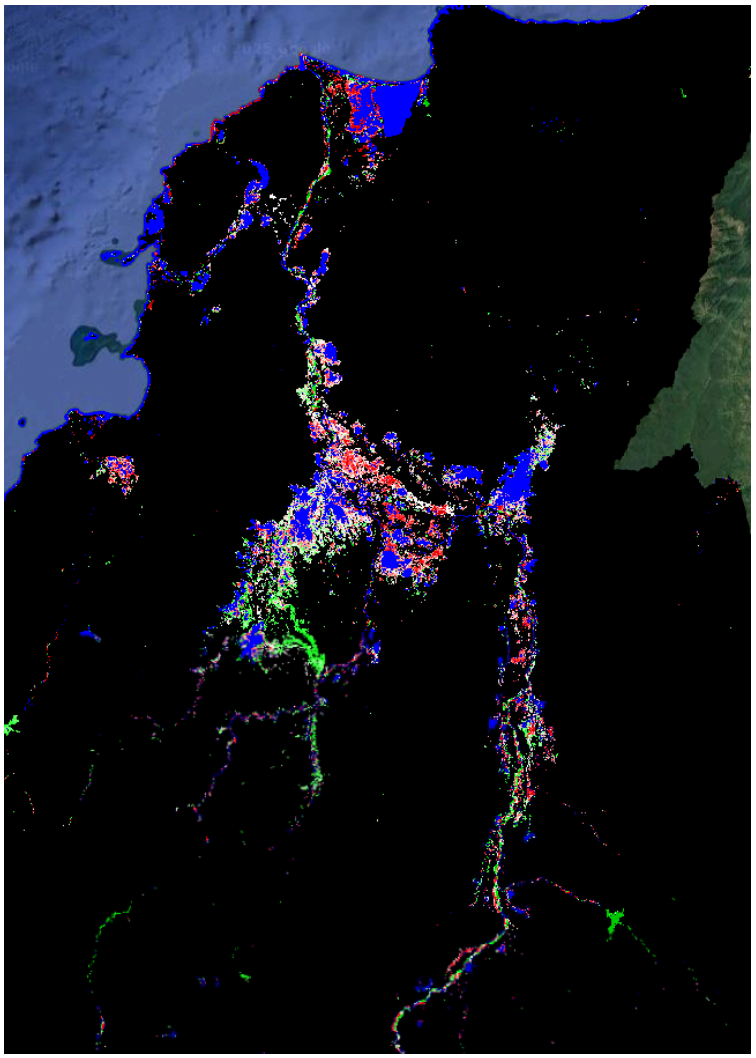


Figura 22. Ejemplo de resultados de cálculo de tendencias para la depresión Momposina en Colombia utilizando la prueba estacional de Mann Kendall. Los datos en rojo indican una disminución, los datos en verde un aumento y los datos en blanco y azul, estabilidad. Sólo se presentan datos con valores significativos. Fuente: elaboración propia.

5 Referencias

Barkhordarian, A., Saatchi, S. S., Behrangi, A., Loikith, P. C., & Mechoso, C. R. (2019). A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. *Scientific Reports*, *9*(1), 15331. https://doi.org/10.1038/s41598-019-51857-8

Donchyts, G., 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

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

Gilbert, R.O. (1987). Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring.

Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (1995). Statistical methods in water resources. Elsevier, NY, 338-340.

Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resources Research*, *20*, 727-732.

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

MapBiomas. (2023). MapBiomas Agua – Colección 1 de la Serie anual de Mapas de Superficie de agua de Amazonía (Datos). MapBiomas Amazonía. Recuperado el 14 de octubre de 2023, de https://amazonia.mapbiomas.org/

MapBiomas. (2025). MapBiomas Cobertura y Uso – Colección 4 de la Serie anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Colombia (Datos). MapBiomas Colombia. Recuperado el 14 de octubre de 2025, de https://colombia.mapbiomas.org/

Morell, O., & Fried, R. (2009). *On Nonparametric Tests for Trend Detection in Seasonal Time Series* (pp. 19-39). https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2121-5_2

Oliveira, B. C., & Souza, C. M. (2019). *A novel approach to monitor water in Brazil with satellite images - a concept note* (WWF Report 2019). WWF.

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/nature2058

RAISG. (2025). *Base de Datos Geográfica, raisg_base_N* (Base de datos geográfica). Recuperado el 15 de noviembre de 2025, de 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. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3469-3481.

Schmidt, Anne, y Theo Van der Sluis. 2021. “Contribution of remote sensing techniques for monitoring Natura 2000 sites”. En Improving the Availability of Data and Information on Species, Habitats and Sites, 41–67. Wageningen, The Netherlands.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.

Souza, C. M., 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). https://doi.org/10.3390/w11030566

Szabo, S., Gácsi, Z., & Balázs, B. (2016). Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories.

Turpo Cayo, E. Y., Borja, M. O., Espinoza-Villar, R., Moreno, N., Camargo, R., Almeida, C., Hopfgartner, K., Yarleque, C., & Souza, C. M. (2022). Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine. *Remote Sensing*, *14*(9). https://doi.org/10.3390/rs14091974

WWF. (2020). *Living Planet Report 2020: Bending the curve of biodiversity loss*. (R. E. A. Almond, M. Grooten, & T. Petersen, Eds.).

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.