

MAPBIOMAS
[AGUA]



Documento de base teórica sobre algoritmos (ATBD)

Colección 4, Versión 1

Equipo Perú:

Joaquin Romualdo, Cristhian Vega, Ricardo Valverde

Junio 2026

Tabla de contenido

Contenido

Lista de tablas	4
Lista de figuras	4
1. Introducción	6
1.1. Alcance y contenido del documento	6
1.2. Descripción General	6
1.3. Ciencia y aplicaciones clave	7
2. Información general y antecedentes	8
2.1. Contexto e información clave	8
2.2. Perspectiva histórica: mapas existentes e iniciativas cartográficas	8
3. Metodología de detección de superficie de agua	9
3.1. Imágenes Landsat	10
3.2. Análisis de mezcla espectral	10
3.3. Regionalización y Subregionalización	11
3.3.1. Regiones de clasificación	11
3.3.2. Subregiones específicas	13
3.4. Algoritmo para la detección de superficies de agua	14
3.4.1. Clasificador subpíxel de superficie de agua (SWSC)	14
3.4.2. Mosaicos auxiliares	16
3.4.3. Obtención de Datos mensuales de agua	18
3.5. Filtro temporal	20
3.6. Enmascaramiento	24
3.7. Obtención de Datos anuales de agua	24
4. Metodología de categorización de cuerpos de agua	25
4.1. Delimitación vectorial de objetos	25
4.2. Asignación de propiedades a objetos	26
4.3. Clasificación de objetos basada en muestras de entrenamiento	26
4.4. Filtro temporal	27
4.5. Categorización de cuerpos de agua	27
5. Colección de mapas y análisis	29
5.1. Superficie de agua anual	29
5.2. Superficie de agua mensual	30

5.3. Tipos de cuerpos hídricos	30
5.4. Tendencia de la superficie de agua	31
5.5. Transición de la superficie de agua	32
5.6. Frecuencia de la superficie de agua	33
5.7. Tiempo desde la última ocurrencia	34
6. Consideraciones prácticas	34
7. Conclusiones finales y perspectivas	35
8. Referencias	36

Lista de tablas

Tabla 1. Valores de las bandas visibles e infrarrojas para cada endmembers

Tabla 2. Ejemplo de parametrización de algunas regiones de clasificación en distintos biomas

Tabla 3. Número de regiones de clasificación en Perú.

Tabla 4. Ejemplo de umbrales generales y específicos

Tabla 5. Secuencia de reglas del filtro temporal por bioma

Tabla 6. Esquema de clasificación y descripción de cuerpos de agua

Lista de figuras

Figura 1. Territorio peruano

Figura 2. Proceso metodológico para producir los datos de superficie de agua, 1985-2025

Figura 3. Regionalización de Perú

Figura 4. Regiones específicas en la región de clasificación 1303, Amazonía alta

Figura 5. Reglas de transición del clasificador subpíxel de agua superficial

Figura 6. Lógica para el cálculo del mosaico móvil de 5 meses

Figura 7. Lógica para cálculo del mosaico decendial

Figura 8. Comparación de mosaicos de época en Iquitos para el año 2024

Figura 9. Integración de los mosaicos auxiliares

Figura 10. Flujo lógico de superposición espacial ante presencia y ausencia de datos mensuales

Figura 11. Proceso metodológico para la clasificación de superficie de agua

Figura 12. Esquema lógico de la regla N°1

Figura 13. Esquema lógico de la regla N°2

Figura 14. Esquema lógico de la regla N°3 comparación de meses húmedos e intermedios

Figura 15. Esquema lógico de la regla N°3 comparación de meses secos y el resto de meses

Figura 16. Esquema lógico de la regla N°4

Figura 17. Esquema lógico de la regla N°5

Figura 18. Esquema lógico de la regla N°6

Figura 19. Proceso de enmascaramiento

Figura 20. Secuencia de pasos para la clasificación

Figura 21. Proceso de segmentación de los datos ráster

Figura 22. Propiedades asignadas a vectores

Figura 23. Interfaz de recolección de muestras

Figura 24. Ejemplo de categorías de cuerpos de agua en Tumbes, Perú.

Figura 25. Productos obtenidos en base a los datos mensuales de superficie de agua, disponibles en la plataforma.

Figura 26. Ejemplo de visualización de los datos anuales de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomias Agua.

Figura 27. Ejemplo de visualización de los datos mensuales de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomias Agua.

Figura 28. Ejemplo de visualización de los tipos de cuerpos hídricos (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomias Agua.

Figura 29. Ejemplo de visualización de la tendencia de la superficie de agua en la plataforma de MapBiomias Agua.

Figura 30. Ejemplo de visualización de las transiciones de la superficie de agua en la plataforma de MapBiomias Agua.

Figura 31. Ejemplo de visualización de la frecuencia de la superficie de agua en la plataforma de MapBiomias Agua.

Figura 32. Ejemplo de visualización del tiempo desde la última ocurrencia en la plataforma de MapBiomias Agua.

1. Introducción

1.1. Alcance y contenido del documento

La finalidad de este Documento Base Teórico de Algoritmos (ATBD, por sus siglas en inglés) es proporcionar a los usuarios una guía detallada sobre los pasos metodológicos, contexto de regionalización y justificación de umbrales, que se utilizaron en la generación de los mapas de superficie de agua del Perú, pertenecientes a la Colección 4 de la iniciativa MapBiomás Agua Perú. En el caso específico del módulo de glaciares, los pasos metodológicos se encuentran descritos en Turpo et al. (2022).

Este documento también presenta una descripción general de la iniciativa MapBiomás Agua, un contexto histórico de la influencia del cambio climático en la dinámica del recurso hídrico y antecedentes en la detección de los cuerpos de agua.

1.2. Descripción General

MapBiomás Agua es una iniciativa de la red MapBiomás, cuyo objetivo principal es mapear los cuerpos de agua superficiales en todo el territorio peruano (Figura 1) de manera mensual y anual, desde 1985 hasta 2025.

Esta iniciativa 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 en los últimos años (Souza *et al.* 2019). Este estudio mostró la posibilidad de mejorar la capacidad de la Iniciativa MapBiomás Cobertura y Uso de suelo para detectar y monitorear la dinámica de agua superficial en todos los biomas brasileños. A partir de este contexto, el grupo de trabajo de MapBiomás Agua expandió el mismo enfoque y metodología a todo el territorio brasileño.

Es así como en el 2022, a través de la alianza entre MapBiomás y la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG) se decide adaptar, extender y aplicar la metodología de MapBiomás Agua a los territorios completos de los países amazónicos para poder obtener y comprender la dinámica de agua en los diversos biomas de toda la región.

La metodología para mapear y monitorear el agua superficial se basa en la clasificación a nivel de subpíxel de las imágenes Landsat 5, 7, 8 y 9 junto con el análisis espacial de los cuerpos de agua superficial para identificar los impactos

antropogénicos y los efectos potenciales del cambio climático. Todo el procesamiento de datos se realizó en la plataforma en la nube Google Earth Engine.

Como resultado de esta iniciativa, se obtuvo la colección de mapas que incluyen los datos de: superficie de agua de manera mensual y anual, transiciones, tendencia; y la clasificación de la superficie de agua entre cuerpos naturales y antrópicos.

Otro resultado destacado es que los mapas anuales de superficie de agua se integrarán como transversal en la Colección 4 de Cobertura y Uso de suelo de MapBiomias Perú.

Todos estos datos se encuentran publicados en el módulo de Agua de la plataforma web de MapBiomias Perú, cuyo acceso es de dominio público. Tras el lanzamiento de esta plataforma, la iniciativa planea capacitar a los usuarios finales, incluidos el sector académico, el sector privado y el gobierno.



Figura 1. Territorio peruano.

1.3. Ciencia y aplicaciones clave

El conjunto de datos sobre la dinámica de los cuerpos de agua superficiales ayuda a comprender los sistemas acuáticos y su interacción con otros componentes del medio ambiente, siendo crucial para la toma de decisiones, aportando en 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 y pequeñas represas, apreciación de la calidad de los ecosistemas de agua dulce, investigación y evaluación de cambios en los 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 y Souza, 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. Esto 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.

La novedosa metodología de mapeo de aguas superficiales adoptada por la iniciativa MapBiomás 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.

MapBiomás 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 de detección de superficie de agua

La combinación de la serie histórica de imágenes Landsat junto con las facilidades del procesamiento en la nube proporcionadas por la plataforma Google Earth Engine, permitió a la iniciativa MapBiomás Agua producir el primer conjunto de datos de agua superficial para todos los países amazónicos. La Figura 2 muestra los principales pasos metodológicos que abarcan un clasificador de agua superficial a nivel de subpíxel (SWSC), árboles de decisión y procedimientos de post-clasificación para generar un conjunto de datos anuales y mensuales de agua superficial.

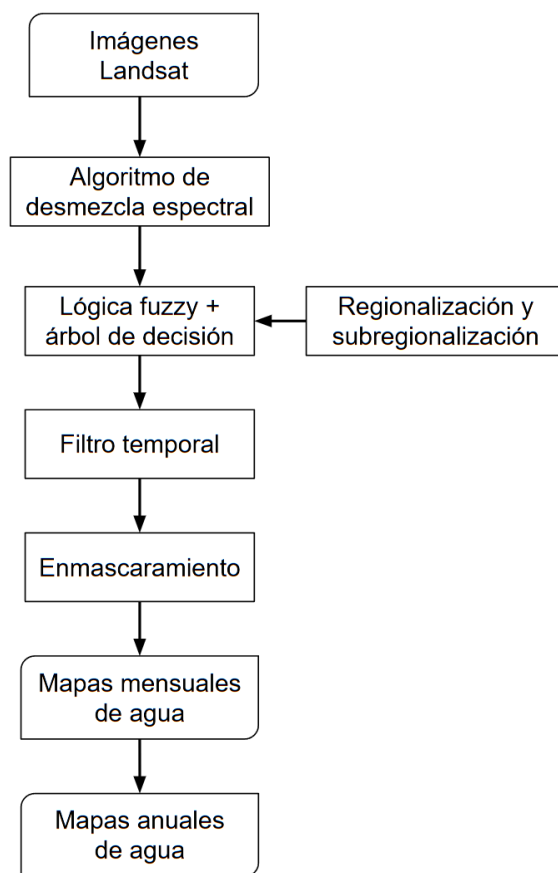


Figura 2. Proceso metodológico para producir los datos de superficie de agua, 1985-2025.

3.1. Imágenes Landsat

El proyecto utilizó imágenes del satélite Landsat, las cuales cuentan con una resolución espacial de 30 metros y están disponibles desde 1972 en la plataforma Google Earth Engine. El tamaño del píxel y su gran alcance temporal facilitan el objetivo de la iniciativa MapBiomás Agua de poder construir una serie histórica de más de 40 años con datos de superficie de agua, por lo que fueron las imágenes apropiadas para utilizarlas de insumo en esta iniciativa.

Es así que se utilizaron las imágenes de la Colección 2 Nivel 1 Surface Reflectance (SR) ortorectificadas a la superficie y los sensores 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.

Para mitigar la nubosidad presente en las escenas, se aplicaron los siguientes procedimientos:

- Filtrado de las escenas con una cobertura de nubes menor al 70% basado en el metadato “Cloud Cover” de las imágenes.

- Aplicación del algoritmo Cloud Score, aplicando un umbral de “Cloud Thresh” de 10,30,50 y 70 para las regiones de amazonía baja, andes y amazonía alta, costa y costa norte respectivamente.
- Aplicación de máscaras en base a las bandas de calidad (“QA_PIXEL”), seleccionando los bits 3 y 4 (Cloud y Cloud Shadow respectivamente).

3.2. Análisis de mezcla espectral

El Análisis de Mezcla Espectral (SMA – por sus siglas en inglés) es una técnica que permite estimar la composición fraccional de píxeles en una combinación de endmembers, en base a las bandas de una imagen satelital. Los endmembers son firmas espectrales puras de los materiales que componen el píxel. La información a nivel de subpíxel obtenida con SMA es útil para caracterizar el agua superficial con mezcla de otros componentes, por ejemplo, suelo y vegetación, superando así la limitación de los clasificadores de píxeles completos, permitiendo el mapeo de humedales, llanuras aluviales, ríos estrechos y pequeños cuerpos de agua.

Para la iniciativa MapBiomás Agua se utilizaron 6 endmembers: vegetación verde (GV), vegetación no fotosintética (NPV), suelo (Soil), nubes (Cloud), sombra (Shade) y nieve (Snow), los cuales se obtuvieron en base a una librería genérica para las imágenes Landsat, basada en los valores de las bandas: rojo, verde, azul (bandas visibles), infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta 1 e infrarrojo de onda corta 2. Los valores de cada banda para cada endmember se muestran en la Tabla 1.

Endmembers	Bandas					
	Blue	Green	Red	Nir	Swir1	Swir2
GV	119	475	169	6250	2399	675
NPV	1514	1597	1421	3053	7707	1975
Soil	1799	2479	3158	5437	7707	6646
Cloud	4031	8714	7900	8989	7002	6607
Shade*	7800	7910	7950	6750	310	380
Snow*	810	650	100	0	0	0

Tabla 1. Valores de las bandas visibles e infrarrojas para cada endmembers.

Debido a las diferencias espaciales entre regiones, se presentan dos casos:

i) En la región de amazonía baja se aplica en cada píxel el SMA utilizando cuatro endmembers para calcular las fracciones de GV, Soil, NPV y Cloud. Para la fracción de shade se utiliza la sombra fotométrica (reflectancia cero en todas las bandas) y se calcula mediante la sustracción de la suma de GV, Soil, Cloud y NPV a 1.

ii) En las regiones de andes, costa y amazonía alta, se calculan las fracciones directamente utilizando seis endmembers en el SMA (GV, Soil, NPV, Cloud, Snow y Shade).

3.3. Regionalización y Subregionalización

3.3.1. Regiones de clasificación

La regionalización en Perú (representados en la Figura 3) surge debido a la heterogeneidad y particularidad que caracteriza a la geografía de nuestro país, por lo que la metodología de clasificación de cuerpos de agua aplicada por MapBiomias Agua fue adaptada para regiones específicas.

El criterio de división de estas regiones se basó tomando como punto de partida los biomas del país: costa, andes, amazonía alta y amazonía baja. Al ver que la heterogeneidad espectral de los cuerpos de agua aún existía incluso dentro de un mismo bioma (un ejemplo se puede apreciar en la Tabla 2), se regionalizó en base a estos criterios:

- Regiones de clasificación propuestas en la iniciativa MapBiomias Cobertura y Uso.
- Criterios propios basados en la distribución geográfica de los cuerpos de agua.
- Criterios específicos basados en una determinada clase de cuerpo de agua, como la región de costa norte camaroneras y la región de glaciares.

región	Código	Cloud	GV	NPV	Shade	Snow	Soil
Costa centro 01	1330	5.51	6.72	0.03	82.50	0.72	2.54
Costa norte camaroneras	1327	2.24	4.65	0.00	88.66	1.03	1.73
Andes occidental 01	1317	4.47	7.61	0.01	75.42	0.12	10.17
Andes glaciares	1315	1.06	0	0.02	84.19	12.96	0.01
Amazonía alta norte 03	1304	1.48	12.13	0.09	81.20	0.28	3.05
Amazonía alta sur 03	1309	1.20	8.35	0.01	87.91	0.13	0.87

Tabla 2. Ejemplo de parametrización de algunas regiones de clasificación en distintos biomas.

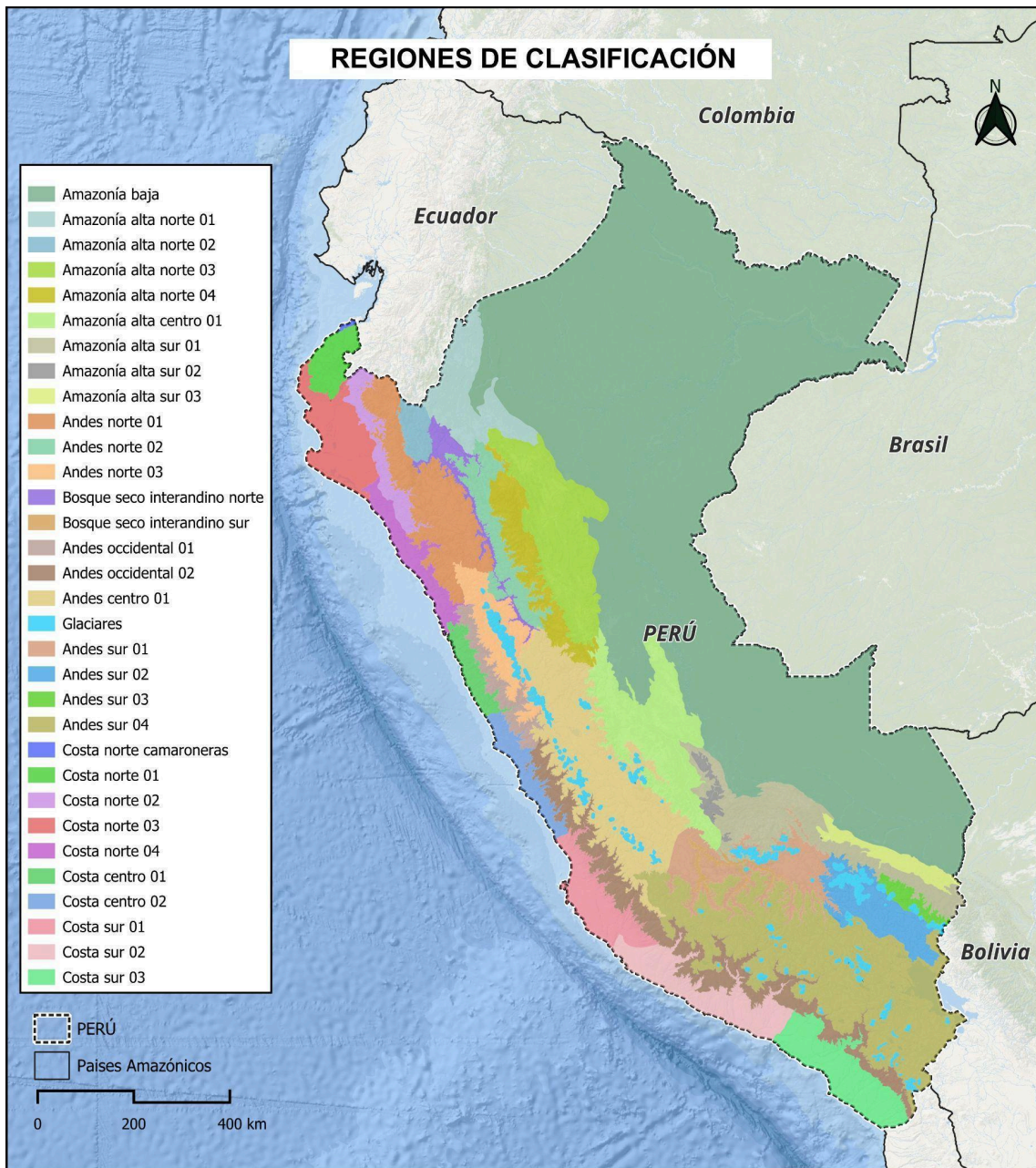


Figura 3. Regionalización de Perú.

Para esta Colección 4, la cantidad de regiones fue de 32, y la distribución por bioma se puede apreciar en la Tabla 3.

Bioma	# de regiones
Amazonía Baja	1
Amazonía Alta	8

Andes	13
Costa	10

Tabla 3. Número de regiones de clasificación en Perú.

3.3.2. Subregiones específicas

Con el objetivo de adaptar los parámetros de clasificación a la heterogeneidad de los cuerpos de agua, se definieron subregiones específicas dentro de cada región de clasificación. Esta estrategia permite aplicar umbrales diferenciados según las características de cada entorno, particularmente en cuerpos de agua como humedales, ríos estrechos o cuerpos de agua mezclados con suelo oscuro, que requieren de un tratamiento especial, ya sea, porque requieren umbrales menos restrictivos (humedales y ríos estrechos) o más altos (suelo oscuro) para asegurar una correcta detección. La aplicación de estos parámetros de forma localizada permite mejorar la detección de estos ambientes sin incrementar la generación de falsos positivos o subestimar agua en el resto de la región de clasificación.

Para la construcción y delimitación de estas subregiones se procedió de la siguiente manera:

- **Procesamiento de la Colección 3:** Se utilizó el ráster de agua acumulada de la Colección 3 de MapBiomás Agua, el cual fue transformado a formato vectorial. Posteriormente, se calcularon propiedades geométricas sobre los polígonos resultantes con el fin de diferenciar y separar los ríos de otros cuerpos de agua, como lagunas y reservorios.
- **Integración de capas auxiliares:** La capa vectorial generada se complementa con cartografía oficial de ríos generada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), además de geometrías desarrolladas específicamente para la detección de otros cuerpos de agua, como humedales y lagunas.

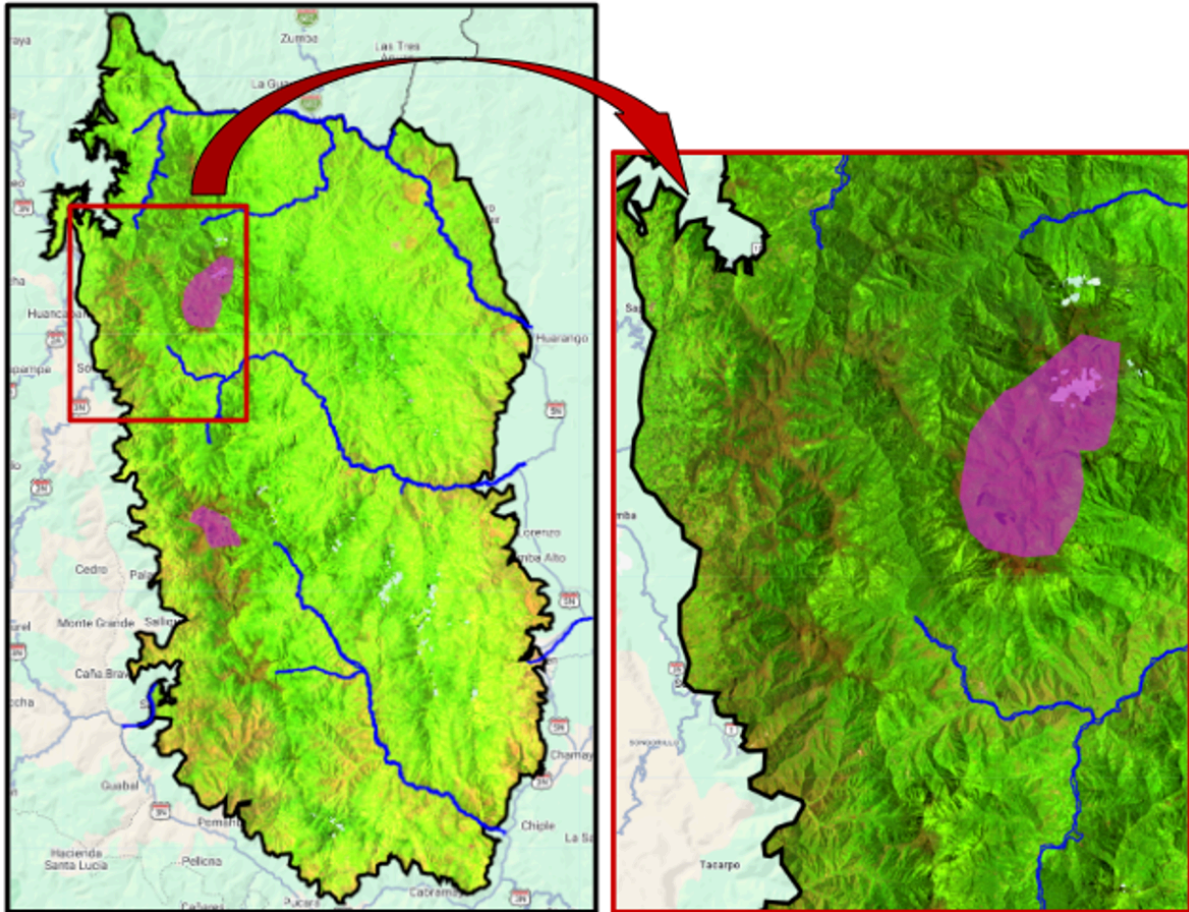


Figura 4. Regiones específicas en la región de clasificación 1303, Amazonía alta.

3.4. Algoritmo para la detección de superficies de agua

3.4.1. Clasificador subpíxel de superficie de agua (SWSC)

El algoritmo clasificador subpíxel de agua superficial (SWSC) utiliza reglas de transición (Figura 5) a lo largo de los umbrales fraccionarios de los endmembers, utilizando un conjunto de funciones lineales basadas en lógicas difusas (reglas fuzzy) independientes, en las que se determina el grado de verdad/certeza (membership) de que un píxel Landsat es clasificado como agua.

Los endmembers utilizados para la detección de agua son Shade, Gv, Soil, Cloud y Snow. Debido a que el agua absorbe gran parte de la radiación electromagnética en las bandas visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta de Landsat, el SWSC utiliza la fracción Shade para clasificar la mayoría de los píxeles como agua superficial. En segundo lugar, se utilizan las fracciones de GV y Soil para cuantificar la mezcla de agua superficial con vegetación y suelo. Esta agua superficial mezclada se encuentra a lo largo de los bordes de cuerpos de agua, en ríos estrechos, en ecosistemas de llanuras aluviales y humedales. También, se incluye la fracción de Cloud residual para detectar agua superficial con alta carga

de sedimentos. Esta fracción residual de Cloud se debe a la ambigüedad espectral del endmember de Cloud y Soil. De hecho, el modelo de fracción de Cloud residual se debe a la respuesta espectral del endmember de Soil en píxeles libres de nubes. Finalmente, la fracción Snow se usa para detectar las lagunas de origen glaciar, que, a comparación de las lagunas de origen no glaciar, presentan menor absorción en las bandas visibles.

Debido a la regionalización, para cada subregión se utilizan los endmembers y umbrales que mejor se adecúen a la detección de agua. Para seleccionar estos datos, se hizo un muestreo de puntos de agua/no agua en cada subregión para obtener estadísticos como promedio, mediana, desviación estándar y varianza. En base a este análisis se seleccionaron los endmembers que mayor diferencia tenían entre las clases agua/no agua, y en base al valor del promedio se determinaron umbrales que favorezcan la detección de la clase agua, y la no detección de la clase no agua, para así reducir el número de píxeles de falsos positivos (falsa detección de agua).

En base a estos endmembers se establecen dos tipos de umbrales en cada una de las regiones de clasificación:

- **Umbrales generales:** permiten clasificar los cuerpos de agua con reflectancia más pura, es decir, aquellos cuerpos de agua que presentan menor mezcla de componentes. Estos se aplican a nivel de toda la región de clasificación y pretenden asegurar la detección de cuerpos de agua de gran tamaño (ríos anchos y lagunas principalmente), así como, limitar la generación de falsos positivos en toda la región.
- **Umbrales específicos:** pueden ser menos restrictivos para detectar cuerpos de agua con mayor mezcla espectral, como ríos estrechos o sinuosos, humedales, lagunas pequeñas, entre otros. O superiores al general en zonas donde el suelo presenta baja reflectancia (suelo oscuro) y genera falsos positivos.

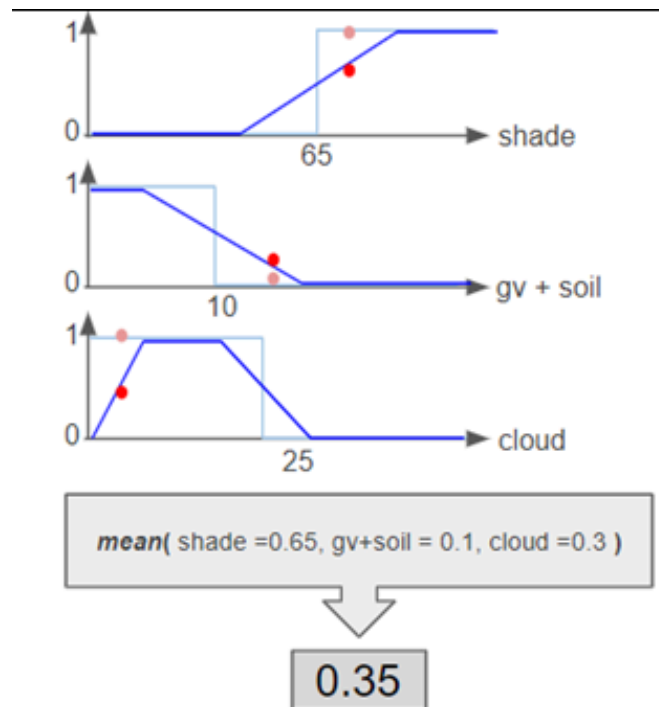


Figura 5. Reglas de transición del clasificador subpíxel de agua superficial. En este ejemplo se aplica una lógica fuzzy para cada endmember y en base a los valores del píxel y los umbrales escogidos, se obtiene la probabilidad final de que sea agua superficial o no.

Un ejemplo de la diferenciación de parámetros entre umbrales generales y específicos para una región de Andes se muestra en la Tabla 4.

Endmembers	Umbral		
	General	Específico 1	Específico 2
shade mínimo	72	50	55
shade máximo	92	60	65
gv ascendente mínimo	0	5	0
gv ascendente máximo	5	10	5
gv descendente mínimo	13	35	30
gv descendente máximo	23	45	40
cloud descendente mínimo	8	10	4

cloud descendente máximo	12	15	14
--------------------------------	----	----	----

Tabla 4. Ejemplo de umbrales generales y específicos.

Luego se calcula el grado de verdad utilizando un peso específico para cada endmember, y finalmente, obtener un mapa continuo de memberships con valores que oscilan entre 0 y 1.

3.4.2. Mosaicos auxiliares

La falta de datos sea esta por enmascaramiento de sombras y nubes o imágenes con alto porcentaje de nubes que se descartan, es un problema que afecta a todas las regiones del Perú. Una alternativa para solucionar estos vacíos de información es la generación de tres mosaicos auxiliares:

- **Mosaico móvil de 5 meses:** basado en una ventana temporal móvil de 5 meses (para amazonía alta se usan 7 meses), compuesta por dos meses adelante y dos atrás alrededor del mes de detección. Esta ventana se calcula de manera independiente para cada mes de la serie temporal. Con esta ventana, se filtran las imágenes Landsat por mes y se genera un mosaico mensual mediante la mediana (en total 5 mosaicos mensuales).

Posteriormente, a cada mosaico se le aplica el algoritmo clasificador subpíxel de agua superficial (SWSC) para generar un mapa continuo de memberships. Por último, se realiza un promedio ponderado de los 5 meses, otorgándole el peso a cada mes de acuerdo con su cercanía al mes central.



Figura 6. Lógica para el cálculo del mosaico móvil de 5 meses.

- **Mosaico decendial:** se basa en una ventana temporal interanual, compuesta por el mes de objetivo y el mismo en 5 años adelante y 5 años atrás (para amazonía alta se usa 2 años adelante y 2 atrás). Se filtran las imágenes Landsat por mes y año y se generan mosaicos mensuales mediante la mediana (11 mosaicos en total). Para cada mes y año se aplica el algoritmo clasificador a nivel de subpíxel para obtener la probabilidad. Luego, se genera la probabilidad promedio considerando solo los años con observaciones válidas. Por último, se enmascara el resultado mediante una condicional que establece que el número de observaciones de años posteriores al año objetivo sean mayores o iguales a las observaciones de años anteriores.



Figura 7. Lógica para el cálculo del mosaico decendial.

- **Mosaico de época:** para la generación del mosaico de época, se utilizan las imágenes Landsat disponibles de un año objetivo y se selecciona la banda correspondiente al endmember "soil". Luego se reducen mediante un determinado percentil, el cual varía con relación a la estacionalidad (húmedo, seco o de transición) y a la región. Este ráster se emplea como umbral para enmascarar los píxeles de cada imagen del año, conservando aquellos cuyos valores cumplen una condición definida respecto al percentil. Por ejemplo, para un mosaico de época húmeda se seleccionan los píxeles con menores valores de soil, mientras que para un mosaico de época seca se conservan los de mayores valores. Finalmente, se genera el mosaico de época aplicando la mediana al conjunto de imágenes enmascaradas y se le aplica el algoritmo clasificador (SWSC) para obtener la probabilidad. El uso de un determinado mosaico de época depende del mes de análisis y de la región de clasificación.

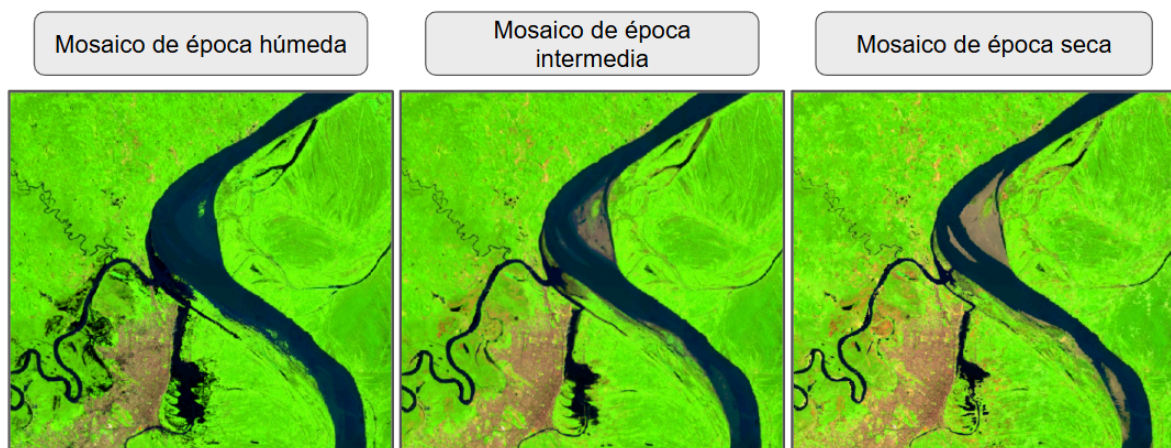


Figura 8. Comparación de mosaicos de época en Iquitos para el año 2024.

Finalmente, el mosaico móvil de 5 meses y el mosaico de época se integran en un mosaico anual (figura 9), de forma en la que predomina el mosaico de 5 meses (debido a que se asemeja más a la realidad por estar cerca al mes central), usando el mosaico de época como background, para rellenar los píxeles faltantes (al usar todas las imágenes disponibles en el año, el mosaico de época tiende a estar más completo que el mosaico de 5 meses).

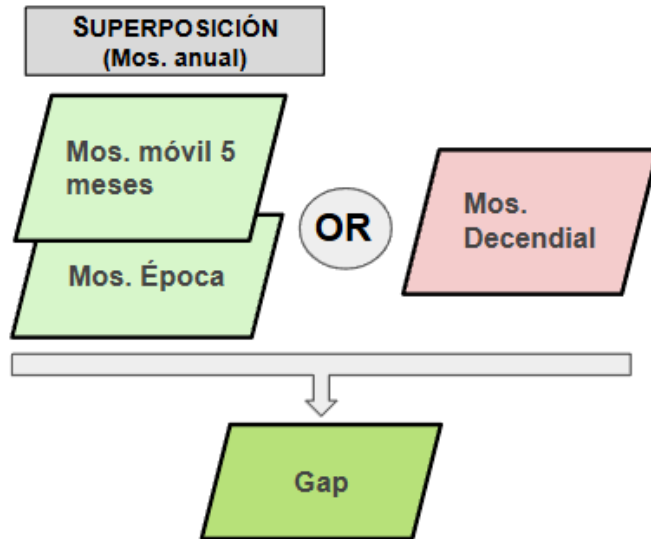


Figura 9. Integración de los mosaicos auxiliares.

3.4.3. Obtención de Datos mensuales de agua

3.4.3.1. Clasificación de superficie de agua

Los mapas mensuales se complementaron con procedimientos para restaurar falsos negativos y remover falsos positivos, basados en métricas temporales. También se hace una diferenciación en dos contextos: cuando hay información mensual disponible, la detección se basa exclusivamente en el membership mensual, mientras que cuando no hay información mensual (píxeles vacíos), la detección se basa en el membership generado por los mosaicos auxiliares (Figura 10).

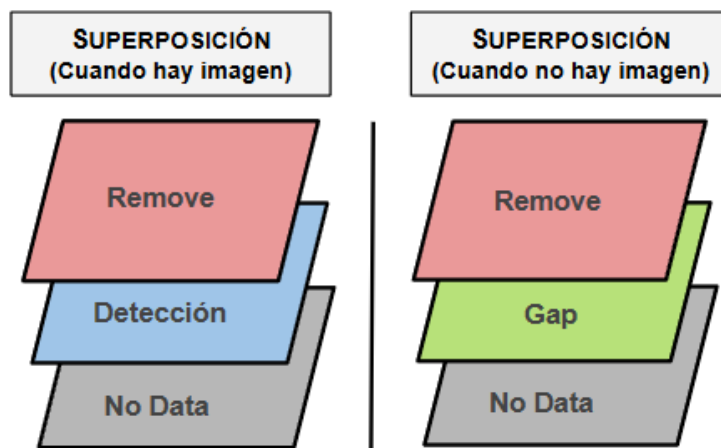


Figura 10. Flujo lógico de superposición espacial ante presencia y ausencia de datos mensuales.

Una vez hecha la diferenciación de los contextos, se aplica el clasificador sub píxel de superficie de agua (SWSC) a las imágenes mensuales, obteniendo un ráster cuyo valor de probabilidad para cada píxel oscila entre 0 y 1. A este ráster, se le aplica un umbral que tiene dos condiciones: cuando el píxel tiene un valor menor a un umbral determinado de pendiente, se aplica un umbral de detección de agua que oscila entre $> 0.6 - 0.67$ dependiendo de la región; mientras que si tiene un valor mayor al umbral determinado de pendiente, se aplica un umbral de detección que oscila entre $> 0.8 - 0.9$. Esta diferenciación se aplica debido a que es más improbable que un cuerpo de agua tenga una pendiente elevada, eliminando así falsos positivos que se generan por sombras de montañas.

Posteriormente, para los píxeles que no cuentan con información disponible, se rellenan los vacíos (gap) aplicando el SWSC a los mosaicos auxiliares (anual y decendial), utilizando un umbral de inclusión de 0.5 a ambos mosaicos cuando los píxeles tienen un valor menor al umbral de pendiente, y un umbral de inclusión de 0.8 cuando los píxeles tienen un valor mayor al umbral de pendiente. Adicionalmente, se utiliza una condicional para que la inclusión (gap) funcione así exista sólo uno de los dos mosaicos auxiliares (si existen ambos mosaicos, los dos deben ser mayor al umbral de detección para que se clasifique como agua).

La presencia de sombras de nubes u otros objetos oscuros en la escena Landsat también puede producir falsos positivos en la clasificación de agua, por lo que se aplicó un filtro de remoción para reclasificar como no agua aquellos píxeles con una probabilidad < 0.35 basados en el mosaico anual.

Finalmente, el ráster de clasificación (Figura 11) se compone de la detección mensual (basado en los mosaicos mensuales disponibles) + la inclusión en píxeles sin información (basado en los mosaicos auxiliares) - la remoción (basado en el mosaico anual).

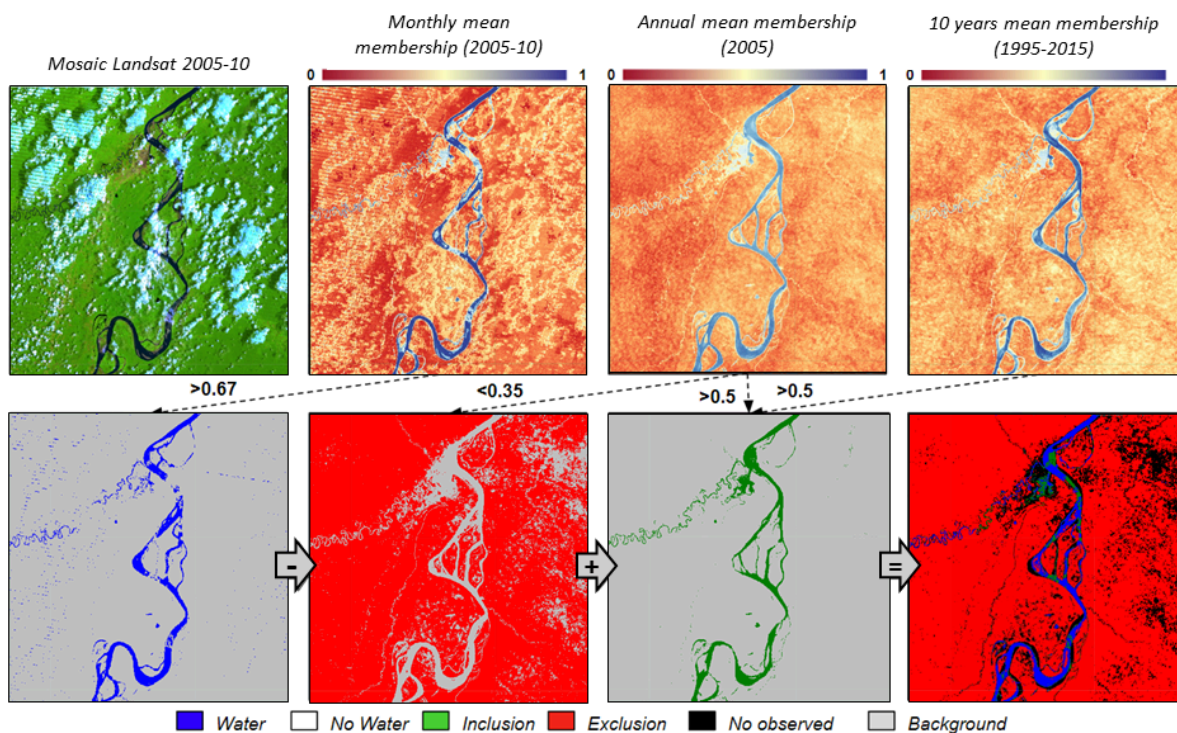


Figura 11. Proceso metodológico para la clasificación de superficie de agua. a: Mosaico Landsat mensual; b: Membership mediana mensual de SWSC; c: Membership anual de SWSC; d: Membership decadal de SWSC; e: Clasificación mensual de agua superficial; f: Área de remoción (posibles falsos positivos); g: Inclusión de agua superficial, basado en los umbrales de c y d. h: Mapa final de agua superficial del mes, con inclusión y remoción correspondiente.

3.4.3.2. Máscara basada en la pendiente

Una vez se obtiene el ráster de probabilidad mensual, se hace un enmascaramiento de los píxeles que cumplen con el umbral de detección de agua en base a dos variables: HAND y pendiente (derivado del DEM SRTM).

- **HAND:** Es un modelo de terreno que normaliza la topografía midiendo la distancia vertical entre cualquier punto de un paisaje y su canal de drenaje o arroyo más cercano. Este producto se encuentra disponible en Google Earth Engine y tiene una resolución espacial de 30 metros, por lo que es compatible con las imágenes Landsat. Se utilizan valores que oscilan entre 40 y 60 que cambia en función a la región de clasificación.
- **Pendiente topográfica:** Se utiliza la pendiente generada del DEM SRTM disponible en Google Earth Engine como una máscara que ayuda a reducir los falsos positivos. Al igual que HAND, cuenta con una resolución espacial de 30 metros. Se utilizan valores que oscilan entre 10 y 20, que cambia en función a la región de clasificación.

3.5. Filtro temporal

Para mejorar la superficie de agua clasificada, se optó por el desarrollo de un paso posterior que se compone de una serie de reglas que eliminan falsos positivos y corrigen falsos negativos teniendo en cuenta criterios temporales. El uso y no uso de cada una de estas reglas, así como, el orden de aplicación depende de cada bioma.

- a) Regla 1: Identifica la fecha en la que un píxel se convierte o se detecta como agua por primera vez de manera estable. Para ello, se evalúa la persistencia temporal de un píxel clasificado como agua inmediatamente después de su aparición en base a una ventana móvil de 24 meses generalmente. Asimismo, se integra un umbral dinámico que corresponde al porcentaje mínimo de detecciones requeridas dentro de dicha ventana para que un píxel sea considerado como primera detección válida.

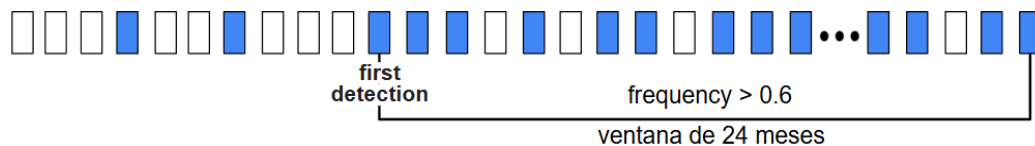


Figura 12. Esquema lógico de la regla N°1.

- b) Regla 2: corrige falsos negativos ocasionados por píxeles con reflectancia alterada por nubes o por la falta de información en el mosaico mensual y auxiliares. El algoritmo evalúa la persistencia del agua analizando el contexto temporal inmediato del píxel (hacia el pasado y hacia el futuro) mediante ventanas móviles. Un píxel clasificado originalmente como “no-agua” se corrige a “agua” si se comprueba su presencia al menos una vez tanto adelante como hacia atrás.

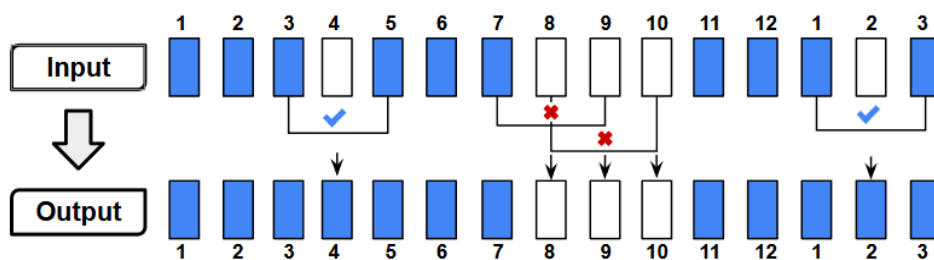


Figura 13. Esquema lógico de la regla N°2.

- c) Regla 3: busca corregir las contradicciones entre épocas. El algoritmo asume que no es posible que un píxel presente más detecciones de agua en la época seca o de transición que en la época húmeda. Por tanto, las detecciones presentes solo en la época seca o intermedia se reclasifican como “no agua”.

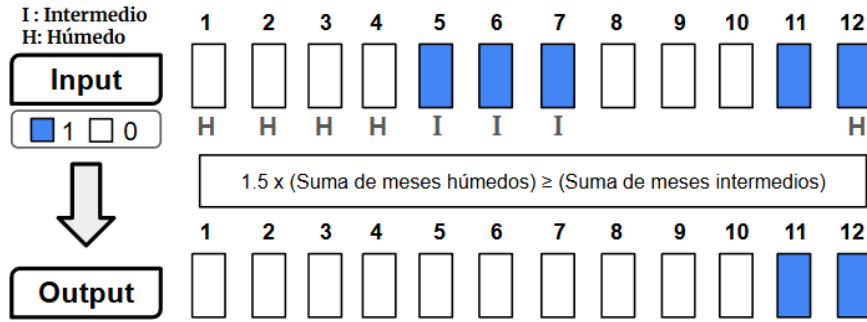


Figura 14. Esquema lógico de la regla N°3 comparación de meses húmedos e intermedios.

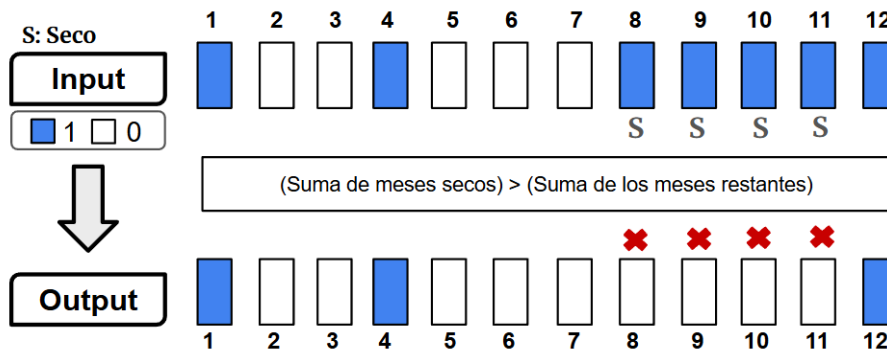


Figura 15. Esquema lógico de la regla N°3 comparación de meses secos y el resto de meses.

d) Regla 4: evalúa la permanencia de un píxel hacia adelante tomando en cuenta la primera detección válida. El algoritmo evalúa la tasa de permanencia calculando la proporción de detecciones de agua entre la primera detección y el último mes de la serie histórica. Si un píxel supera un determinado umbral (0.8-0.9), se asume como agua permanente, y se ejecuta la reclasificación de todos los meses detectados como “no agua” entre la primera detección y el último mes de la serie.

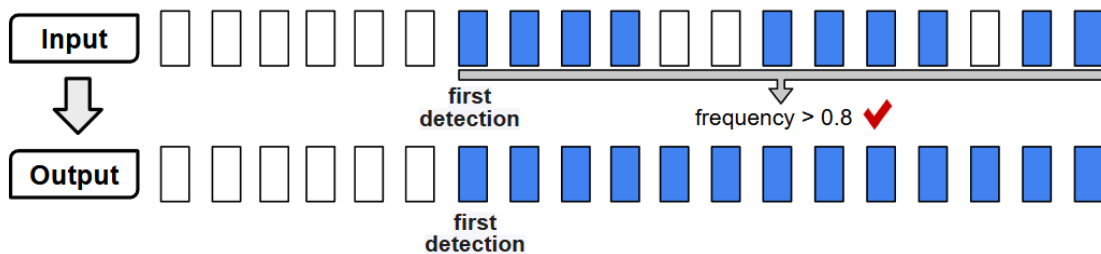


Figura 16. Esquema lógico de la regla N°4.

- e) Regla 5: Elimina los falsos positivos presentes antes de la primera detección. El algoritmo evalúa el intervalo entre el primer mes de la serie y la primera detección válida (establecida en la Regla 1). Luego, calcula la proporción de detecciones en dicho intervalo y si no se supera un determinado umbral se asume como errores y se reclasifican como "no agua".

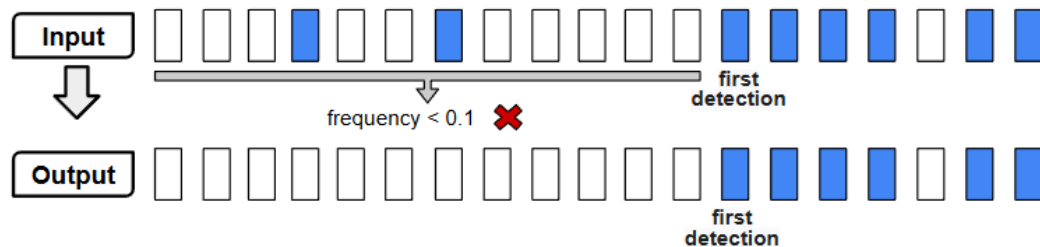


Figura 17. Esquema lógico de la regla N°5.

- f) Regla 6: Debido a que la recurrente cobertura de nubes durante los meses húmedos limita la calidad de los píxeles e induce a subestimaciones en la dinámica hídrica, se implementó un criterio de corrección basado en la frecuencia anual para subsanar estas omisiones a gran escala. Esta regla busca compensar la falta de detección en periodos críticos de alta nubosidad y píxeles de calidad baja. Para ello, el algoritmo evalúa la sumatoria anual de detecciones de agua; si un píxel registra una presencia persistente a lo largo del año (≥ 4), se rellenan automáticamente como "agua" las omisiones ocurridas entre enero y abril. Bajo la misma lógica, si la persistencia anual es más robusta (≥ 8), se corrige el mes de diciembre.

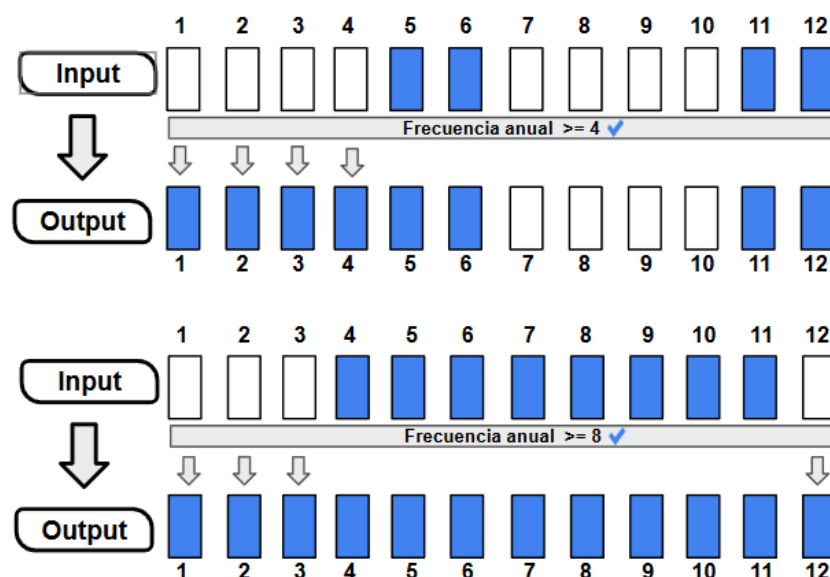


Figura 18. Esquema lógico de la regla N°6.

Debido a la heterogeneidad espacial presente entre biomas, se hizo una regionalización de las reglas, detallado en la tabla 5.

Regiones	Orden de aplicación				
	1°	2°	3°	4°	5°
Amazonía baja	Regla 1	Regla 2	Regla 4	Regla 5	-
Amazonía alta	Regla 1	Regla 2	Regla 6	Regla 3	Regla 4
Andes	Regla 3	Regla 1	Regla 2	Regla 4	Regla 5
Costa	Regla 3	Regla 1	Regla 2	Regla 4	Regla 5

Tabla 5. Secuencia de reglas del filtro temporal por bioma.

3.6. Enmascaramiento

Como última etapa del procesamiento, se diseñó e implementó una máscara espacial con el objetivo de eliminar de forma definitiva los falsos positivos persistentes al filtro temporal preservando las áreas con presencia de cuerpos de agua. Esta máscara de control integra cuatro insumos geoespaciales clave:

- El acumulado de la frecuencia histórica de agua de la colección 3 de MapBiomias agua Perú.
- Un mapa ráster optimizado a partir de la red de ríos vectoriales generada en la fase de subregionalización.
- Cartografía de regiones específicas delimitadas en zonas donde se detectaron cuerpos de agua omitidos por la Colección 3 de MapBiomias agua.
- Inclusión de la clase "Arroz" de la Colección 3 de cobertura y uso de MapBiomias Perú, utilizada con el fin de remover estas áreas agrícolas debido a que presentan una reflectancia similar al agua.

La integración de los 3 primeros insumos permite preservar las zonas de agua real, mientras que la capa de arroz permite eliminar falsos positivos.

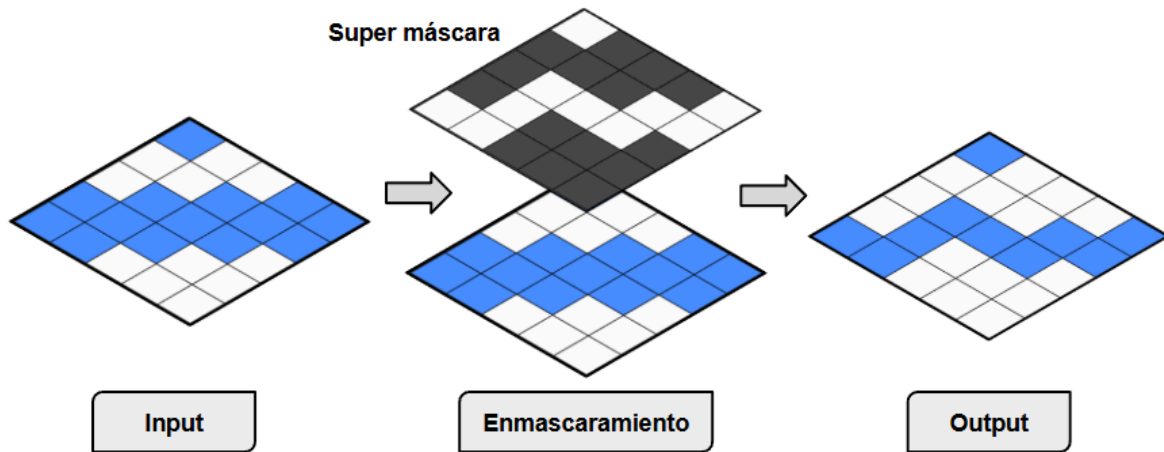


Figura 19. Proceso de enmascaramiento.

3.7. 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 bioma amazónico, se considera una frecuencia ≥ 6 meses, mientras que para el resto de los biomas una frecuencia ≥ 3 meses. La definición del umbral de agua permanente se basa en la existencia de una temporada seca y otra húmeda, en gran parte de las regiones, de tal manera que se abarcan todos los cuerpos de agua permanentes que son naturalmente más dinámicos.

4. Metodología de categorización de cuerpos de agua

La clasificación de los cuerpos de agua incluyó los siguientes pasos:

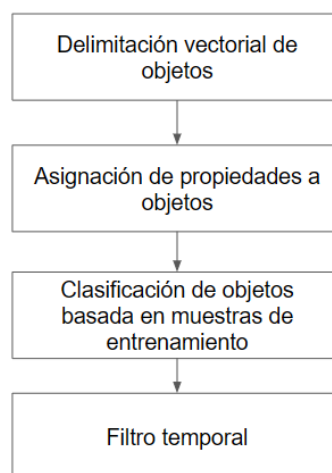


Figura 20. Secuencia de pasos para la clasificación.

4.1. Delimitación vectorial de objetos

La delimitación vectorial de objetos consiste en convertir los mapas anuales de superficie de agua (datos ráster) para cada año, en polígonos regulares (datos vectoriales) dentro de la delimitación espacial de los cuerpos de agua.

Este procedimiento se realizó con una herramienta de segmentación, en la que un cuerpo de agua particular pudo haberse convertido en uno o más polígonos. La función SNIC disponible en Google Earth Engine se utilizó para generar segmentos pequeños y relativamente regulares. La Figura 21 muestra algunos ejemplos de la segmentación basada en datos de frecuencia mensual para un año determinado.

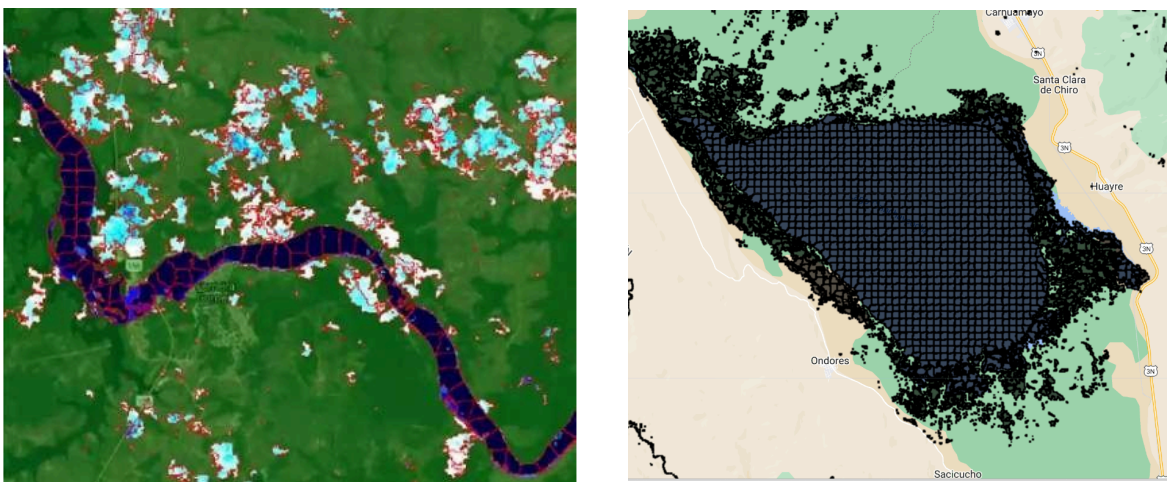


Figura 21. Proceso de segmentación de datos ráster

4.2. Asignación de propiedades a objetos

Después de generar los objetos para cada año, se asignó a cada uno de estos objetos un dataset de características con nuevas propiedades para su posterior uso en la clasificación. Estas propiedades incluyen información relacionada con la morfología del objeto, la geomorfología e información cualitativa de otros estudios sobre clasificación de cuerpos de agua y mapeo de cobertura y uso de la tierra. Las siguientes variables se asociaron a cada objeto: área, perímetro, relación área/perímetro, compacidad, redondez, grado de elongación, relación Laenge-Breite, convexidad, extensión máxima, número de vecinos, número de vecinos dentro de un buffer de 50 metros, clasificación ANA - antrópica, clasificación ANA - hidroeléctrica, clases de cobertura y uso del suelo MapBiomas (urbano, minería, bosque, clase no forestal, pasto), valor máximo SRTM y media de la frecuencia total.

```

▼ properties: Object (28 properties)
  count: 202
  data_anaAnt: 0
  data_anaHid: 0
  data_anaNat: 1
  data_mpbCls: 33
  data_mpbFor: 0.2154718095820371
  data_mpbMin: 0
  data_mpbNnf: 0.0025129006373729268
  data_mpbPas: 0
  data_mpbUrb: 0
  data_srtmMx: 0
  freq_meanAn: 11.999961165802608
  freq_meanTo: 419.9939809331496
  freq_tempPr: 1
  freq_tempUl: 0
  label: -546964717
  morp_aream2: 181092.90434147738
  morp_convex: 0.7218790322491963
  morp_maxExt: 598.7157217544923
  morp_nrVi50: 7
  morp_nrViim: 6
  morp_perime: 2031.732752721085
  morp_r_aPeC: 1.3468491326060188
  morp_r_aPer: 89.13224640344109
  morp_r_circ: 0.5512874862582181
  morp_r_elon: 0.801750342496893
  morp_r_laCu: 0.6967265601438797
  morp_r_shpf: 1.979428828420977

```

Figura 22. Propiedades asignadas a vectores.

4.3. Clasificación de objetos basada en muestras de entrenamiento

La clasificación de los cuerpos de agua se realizó utilizando metodologías diferentes, según la clase a diferencias:

Se usó el algoritmo Random Forest para la clasificación de tres clases en específico: “Ríos, lagos y lagunas”, “Agropecuaria” y “Minería”. Las muestras de entrenamiento se recolectaron en los diferentes biomas (Figura 23), cubriendo diferentes años de la serie temporal. Asimismo, se complementa la información de la clase “Minería” con la información que genera MapBiomas Cobertura y Uso, Colección 3.

Para las clases “Acuicultura e Hidroeléctricas” se usó información vectorial de referencia de autoridades como el Ministerio de Producción y Ministerio de Energía y Minas, respectivamente.

Para la clase “Lagunas de origen glaciar”, se usaron dos criterios de detección: las lagunas deben ubicarse dentro de un buffer de 3 kilómetros respecto a la cobertura glaciar del año 1985, y deben tener un aumento en su superficie de agua mayor al 30%.

Para la clase “Lagunas reguladas”, se detectó mediante un algoritmo que identificaba incrementos en cuerpos de agua ya existentes, y se cruzó con información de referencia de estructuras hidráulicas (reservorios, diques, etc.).

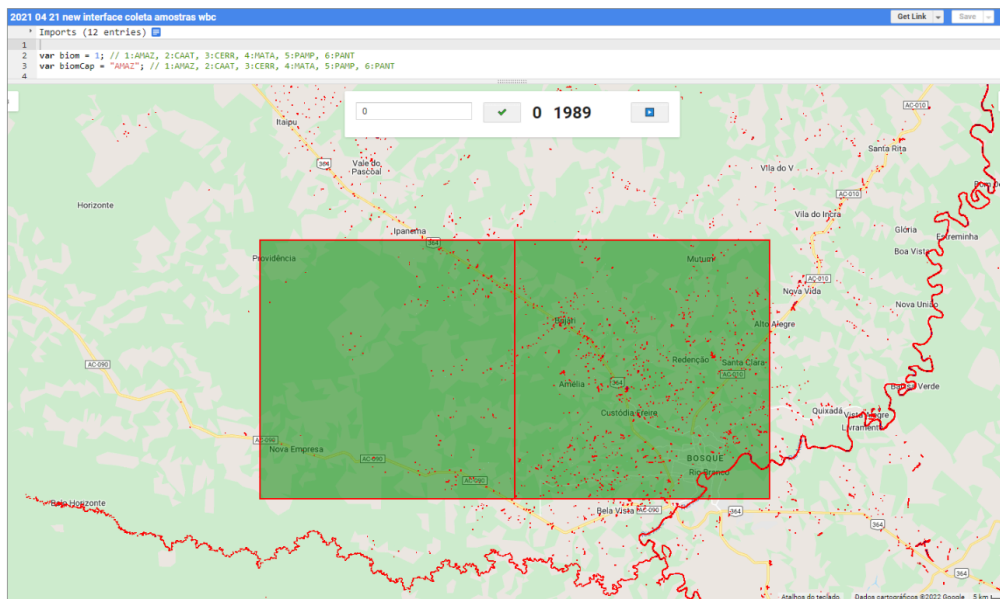


Figura 23. Interfaz de recolección de muestras

4.4. Filtro temporal

Después de la clasificación, los resultados se sometieron a una rutina de post-clasificación aplicando un filtro temporal. La lógica del filtro temporal fue eliminar las transiciones improbables entre clases del mismo segmento a lo largo de la serie temporal.

Por último, todos los polígonos clasificados como falsos positivos dentro de cada año se convirtieron a formato ráster y se utilizaron para filtrar el conjunto de datos de superficie de agua anual y mensual, eliminando los falsos positivos restantes.

4.5. Categorización de cuerpos de agua

A través de estos procesos, la superficie de agua se clasifica jerárquicamente en dos niveles según su origen: Natural y Antrópico. Este enfoque metodológico permitió identificar siete clases específicas: 1) Ríos, lagos y lagunas, 2) Lagunas reguladas, 3) Lagunas de origen glaciar, 4) Minería, 5) Hidroeléctrica, 6) Acuicultura, y 7) Agropecuario y otros; asegurando una tipificación precisa de los recursos hídricos a nivel nacional. La descripción de cada categoría se expone en la Tabla 6.

CLASE NIVEL 1	CLASE NIVEL 2	DESCRIPCIÓN
Natural	Ríos, lagos y lagunas	Cuerpos de agua superficiales naturales de origen fluvial o lacustre, permanentes o estacionales, distribuidos a lo largo de todo el territorio nacional. Incluyen cursos principales y secundarios, así como espejos de agua de origen diverso no intervenidos estructuralmente.
	Lagunas reguladas	Cuerpos de agua de origen natural que presentan un aumento significativo en su superficie como resultado de intervenciones humanas, principalmente mediante infraestructura hidráulica como diques o represas.
	Lagunas de origen glaciar	Cuerpos de agua formados por el retroceso de glaciares a partir de 1985, característicos de zonas altoandinas.
Antrópico	Minería	Cuerpos de agua artificiales originados por actividades extractivas, como tajos abiertos, relaveras, sedimentadores, salares u otras infraestructuras asociadas al sector minero.
	Hidroeléctrica	Embalses o reservorios creados para la generación de energía a partir del aprovechamiento de caudales fluviales.
	Acuicultura	Cuerpos de agua diseñados para el cultivo intensivo de organismos acuáticos, tales como estanques, piscigranjas o jaulas flotantes.
	Agropecuario y otros	Cuerpos de agua artificiales vinculados al almacenamiento o uso de agua para actividades agrícolas, ganaderas, urbanas o industriales.

Tabla 6. Esquema de clasificación y descripción de cuerpos de agua.

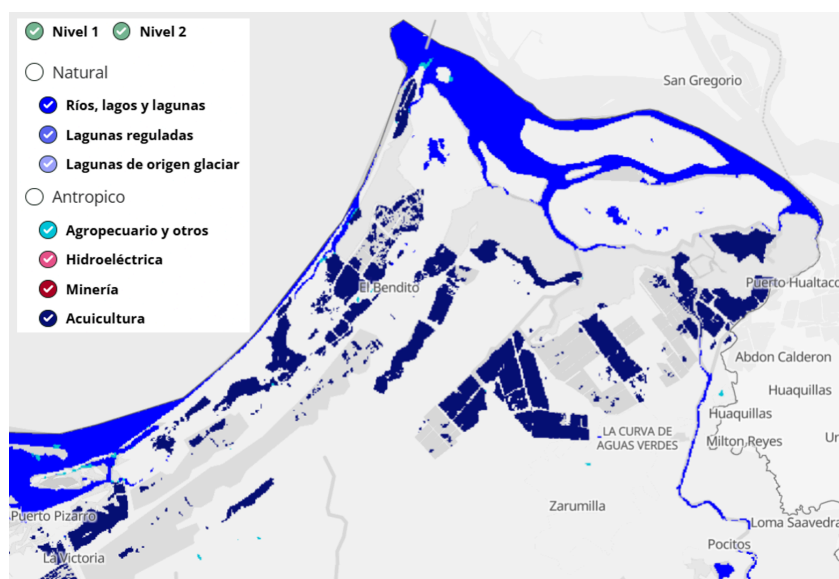


Figura 24. Ejemplo de categorías de cuerpos de agua en Tumbes, Perú.

5. Colección de mapas y análisis

Los principales resultados de la colección 4 están disponibles en la plataforma web pública: <https://plataforma.peru.mapbiomas.org/agua> donde se incluyen siete productos:

- Superficie de agua anual
- Superficie de agua mensual
- Tipos de cuerpos hídricos
- Tendencia de la superficie de agua
- Transición de la superficie de agua
- Frecuencia anual de la superficie de agua
- Tiempo de la última ocurrencia

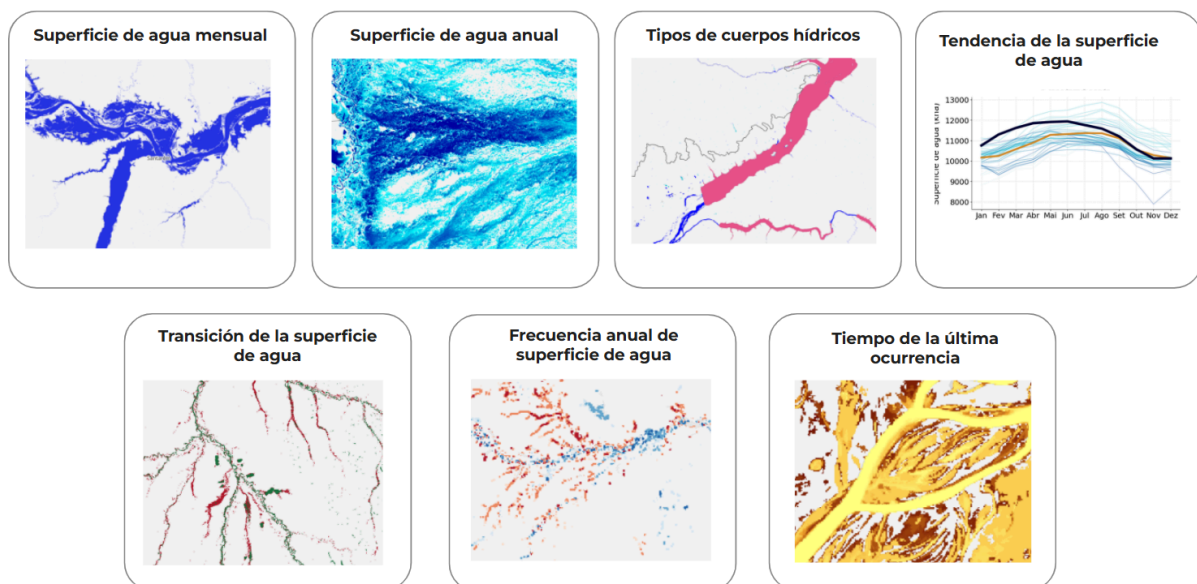


Figura 25. Productos obtenidos en base a los datos mensuales de superficie de agua, disponibles en la plataforma.

5.1. Superficie de agua anual

Esta variable corresponde a los datos anuales de superficie de agua, los cuales pueden ser visualizados en cualquier año en el intervalo de 1985 a 2025 (Figura 26).

Los datos disponibles están enmarcados en diferentes unidades territoriales como bioma, cuenca hidrográfica, departamentos, etc. El usuario puede seleccionar diferentes territorios y rangos temporales, haciendo que el mapa, gráficos y estadísticas se actualicen.

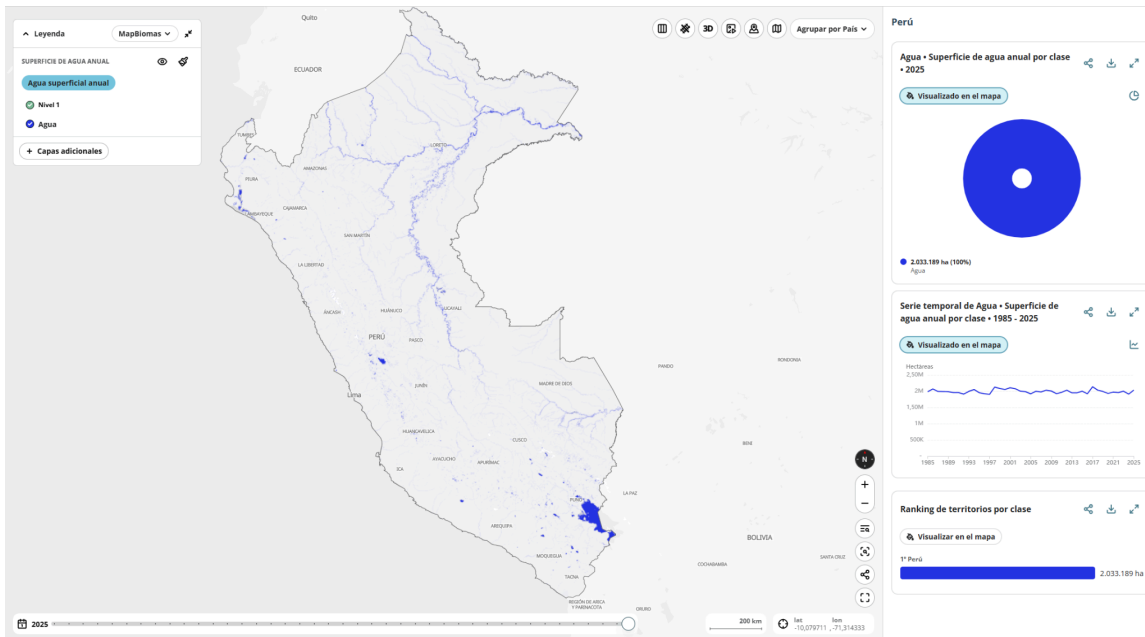


Figura 26. Ejemplo de visualización de los datos anuales de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomias Agua.

5.2. Superficie de agua mensual

La variable corresponde a los datos mensuales de superficie de agua, en donde todos los meses pueden ser visualizados a la vez, en una paleta de colores distinta para cada mes. Adicional al mapa mensual, se agregan gráficos y estadísticas, como el mes con mayor y menor superficie de agua en un determinado año, el promedio de todos los meses de un año, la variación respecto al promedio histórico mensual, y las tendencias mensuales por año.

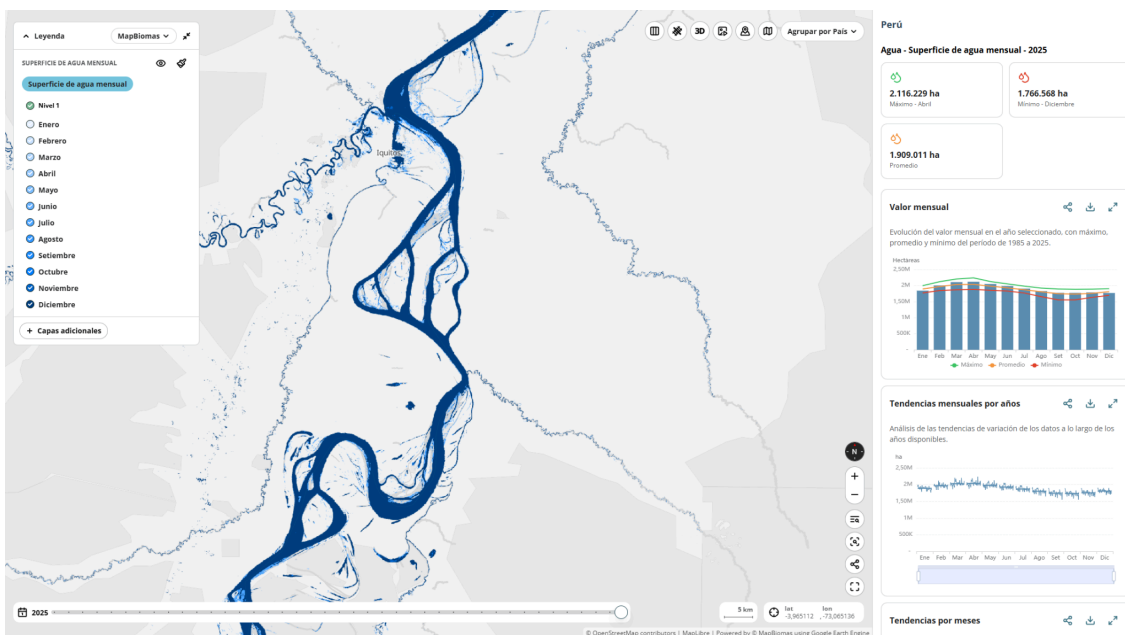


Figura 27. Ejemplo de visualización de los datos mensuales de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomias Agua.

5.3. Tipos de cuerpos hídricos

La variable corresponde a los datos de la clasificación de naturalidad del agua superficial. La clasificación es anual, y el rango de la serie temporal es del 2000 al 2025. Las estadísticas disponibles incluyen el área de la superficie del agua en cada una de las clases de cuerpos de agua cartografiados para el año de interés y considerando la unidad espacial seleccionada en la interfaz, junto con un gráfico con las áreas a lo largo de toda la serie temporal.

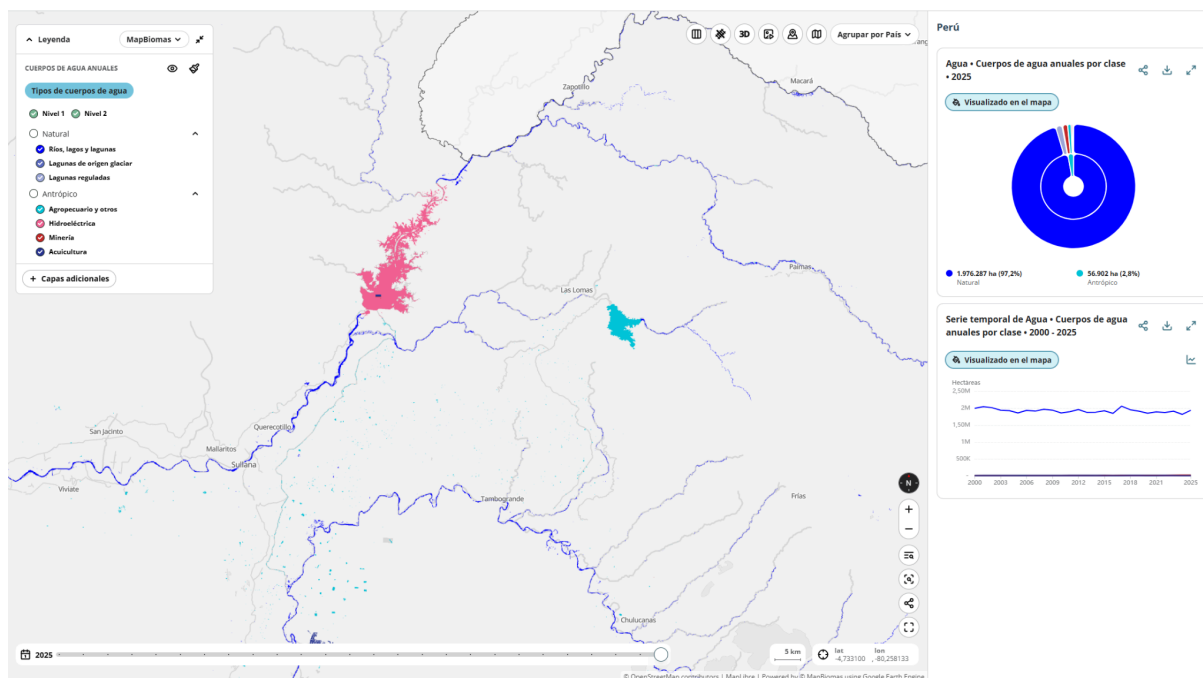


Figura 28. Ejemplo de visualización de los tipos de cuerpos hídricos (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomias Agua.

5.4. Tendencia de la superficie de agua

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

En la plataforma se observa el mapa en distintas tonalidades, debido a la magnitud de la tendencia (positiva y negativa). Sólo se presentan datos con valores significativos.

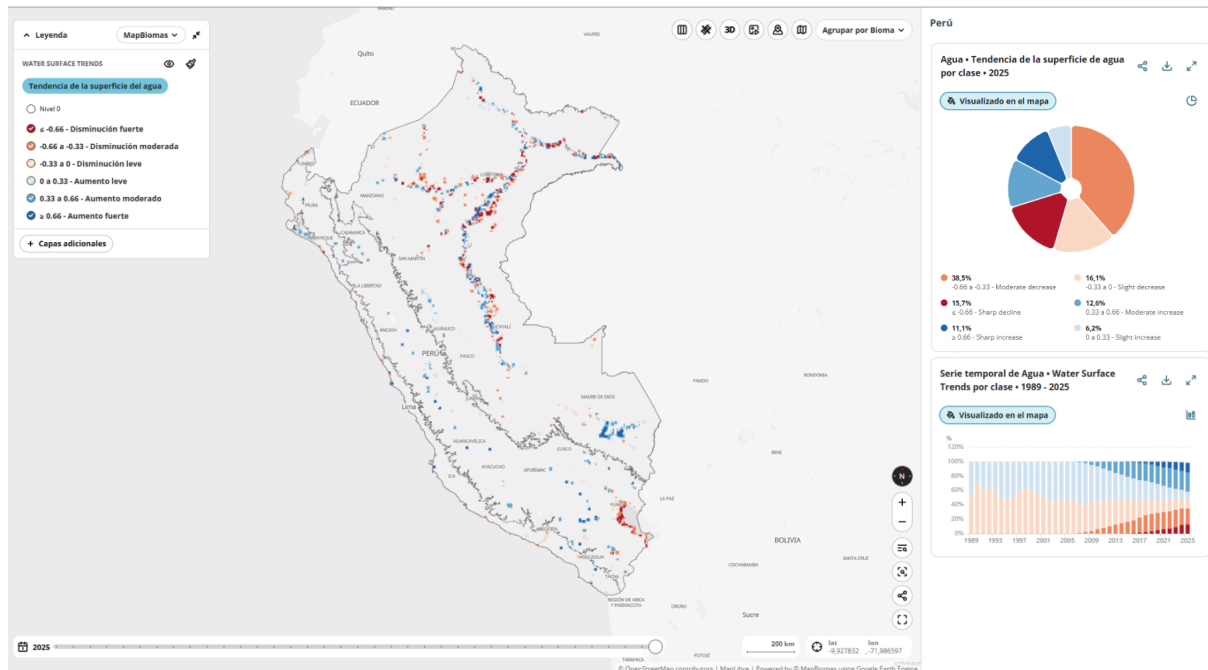


Figura 29. Ejemplo de visualización de la tendencia de la superficie de agua en la plataforma de MapBiomas Agua.

5.5. Transición de la superficie de agua

Esta capa representa la superficie de agua que ha disminuido, que ha incrementado, o que se ha mantenido constante 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 (i.e., 41 años). Se elaboró una composición de color en RGB para facilitar la visualización e identificación de estas categorías.

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).

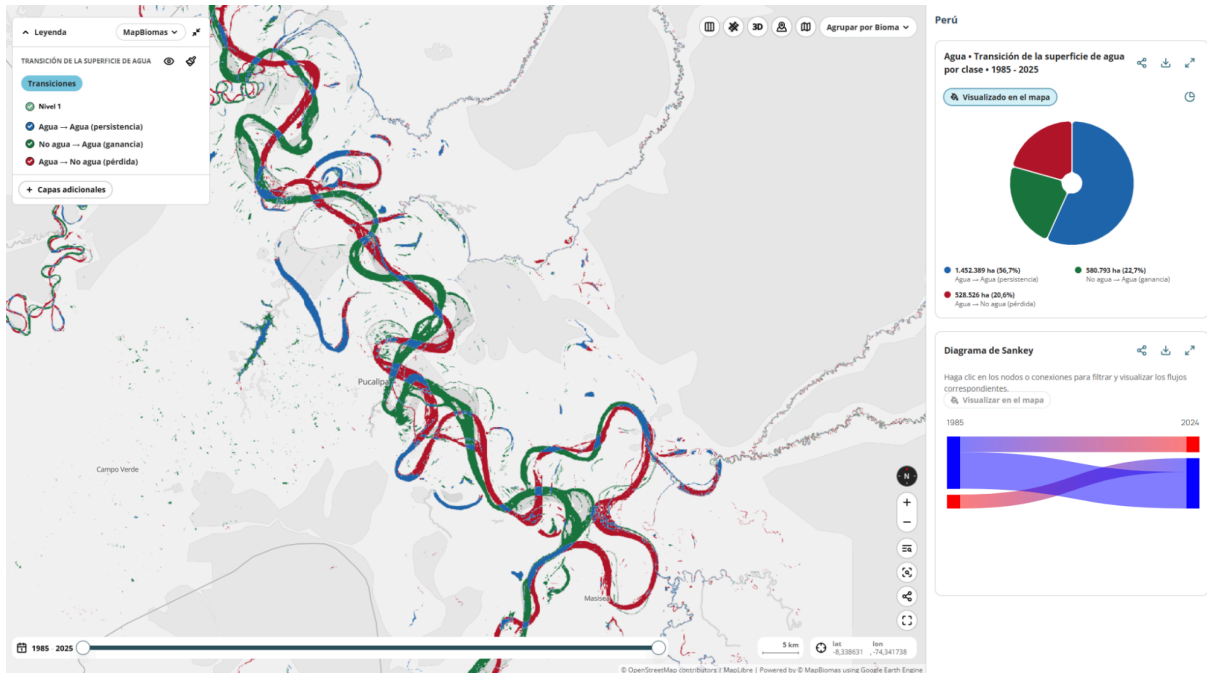


Figura 30. Ejemplo de visualización de las transiciones de la superficie de agua en la plataforma de MapBiomos Agua.

5.6. Frecuencia de la superficie de agua

Esta variable corresponde a la frecuencia basada en el dato anual de superficie de agua. Muestra en distintas tonalidades, la cantidad de veces que un píxel ha sido mapeado a lo largo de la serie temporal.

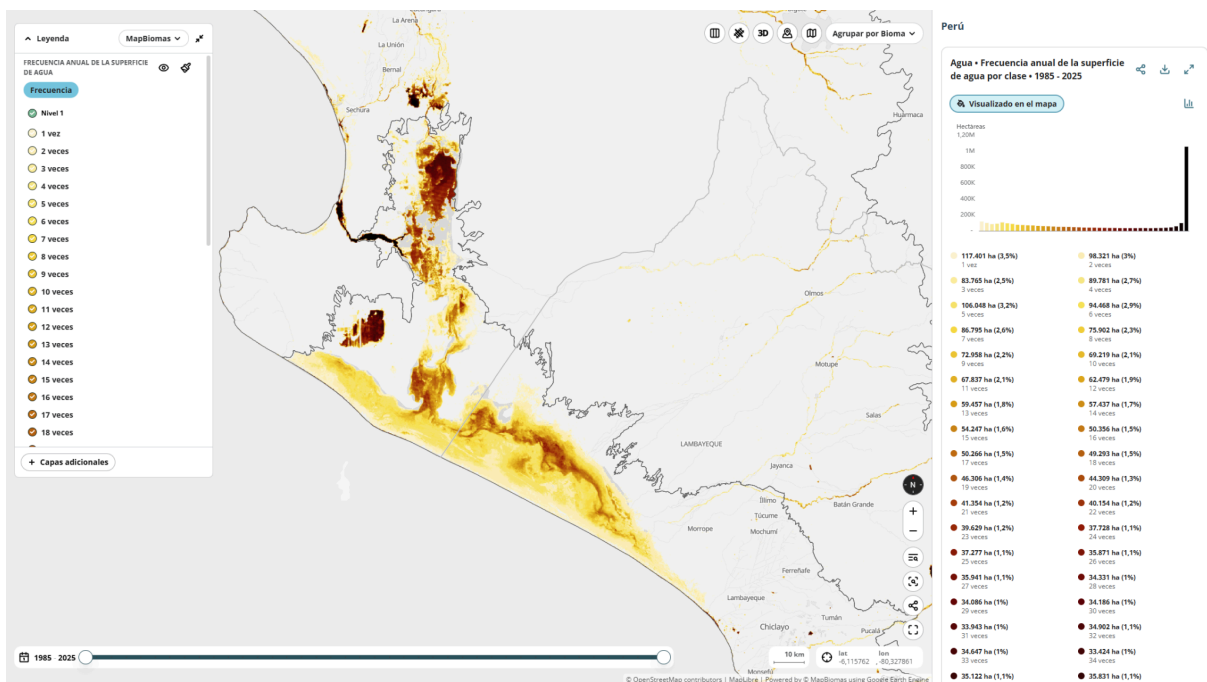


Figura 31. Ejemplo de visualización de la frecuencia de la superficie de agua en la plataforma de MapBiomos Agua.

5.7. Tiempo desde la última ocurrencia

Esta variable hace referencia a la cantidad de años que han pasado desde la última detección de agua, en un determinado año. Es útil para visualizar zonas del pasado donde no hay más superficie de agua en la actualidad.

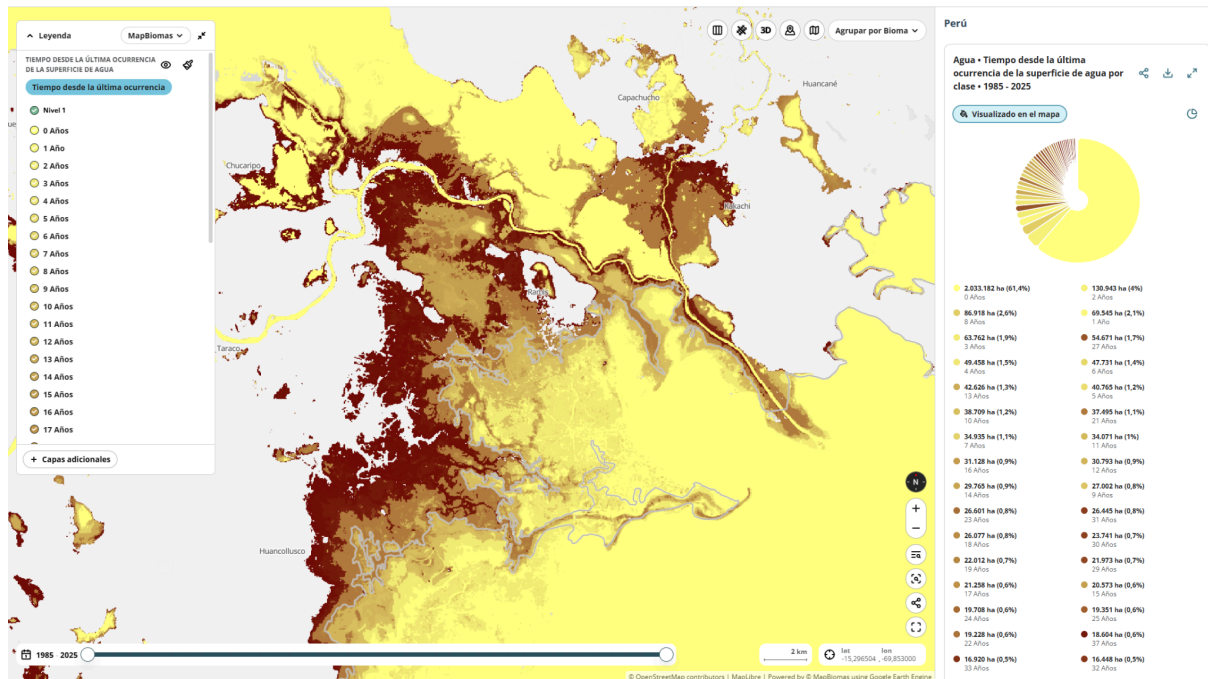


Figura 32. Ejemplo de visualización del tiempo desde la última ocurrencia en la plataforma de MapBiomos Agua.

6. Consideraciones prácticas

La cuarta versión de este producto representa un avance significativo hacia la mejora continua y responde a observaciones y sugerencias realizadas durante el uso y análisis de la primera versión. Este nuevo producto se concibe como una herramienta dinámica, que no solo está diseñada para proporcionar datos relevantes, sino también para evolucionar en respuesta a las necesidades de los usuarios y las mejoras tecnológicas disponibles.

Todos los datos generados están disponibles públicamente, fomentando la transparencia y el acceso abierto. Este enfoque facilita que los usuarios puedan revisar el contenido, identificar aciertos y proponer ajustes necesarios. Las contribuciones y retroalimentaciones de los usuarios son fundamentales para garantizar que las próximas versiones sigan un proceso iterativo de perfeccionamiento y que el producto se mantenga actualizado y relevante.

Es importante que los usuarios consideren que la aplicación de los datos cuantitativos presentados debe ir acompañada de una revisión rigurosa de los niveles de precisión y las métricas de incertidumbre asociadas. Esto permitirá una interpretación más robusta y una evaluación adecuada de su aplicabilidad en diferentes contextos. Los datos deben confrontarse con otras fuentes o estudios complementarios para confirmar su aceptación o señalar limitaciones potenciales.

Este enfoque de mejora continua refuerza el compromiso de los desarrolladores con la calidad y utilidad del producto, promoviendo la colaboración entre la comunidad científica y otros usuarios para maximizar el impacto positivo del conjunto de datos.

7. Conclusiones finales y perspectivas

La Colección 4 de MapBiomás Agua se consolida como un producto fundamental de cartografía para la superficie de agua en los países amazónicos. Su aporte es significativo para comprender la dinámica espacial y temporal de los ecosistemas de agua dulce, proporcionando datos detallados que permiten analizar patrones de cambio, ciclos de aumento o disminución, y estimar ganancias o pérdidas de superficie de agua. Este producto también ha demostrado ser una herramienta clave para asociar estas transformaciones con actividades humanas, generando conocimiento valioso sobre las interacciones entre los sistemas naturales y las presiones antropogénicas.

El logro de este resultado fortalece los objetivos planteados por la iniciativa de MapBiomás Agua y RAISG, destacándose como un esfuerzo colaborativo que contribuye tanto al entendimiento científico como al desarrollo de estrategias de manejo sostenible. La disponibilidad pública de los datos fomenta su uso por parte de investigadores, tomadores de decisiones y comunidades locales, quienes pueden utilizarlos para planificar acciones de conservación, restauración y uso racional del recurso hídrico.

8. Referencias

- Barkhordarian, A., Saatchi, S.S, Behrangi, A., Loikith, PC. and Mechoso, C.R. 2019. A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. *Sci Rep* 9, 15331.
- Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J. and van de Giesen, N. 2016. Earth's surface water change over the past 30 years. *Nat. Clim. Chang.*, 6, 810–813.
- Gilbert, R.O. 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Wiley, NY.
- Helsel, D.R. and R.M. Hirsch. 1995. *Statistical Methods in Water Resources*. Elsevier, NY, 338-340.
- Hirsch, R.M. and J.R. Slack. 1984. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research* 20(6):727-732.
- Hirsch, R.M., J.R. Slack and R.A. Smith. 1982. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resources Research* 18(1):107-121.
- Morell and Fried 2009. On Nonparametric Tests for Trend Detection in Seasonal Time Series
- Oliveira, B.C., Souza, C.M. 2019. A novel approach to monitor water in Brazil with satellite images - a concept note. WWF Report 2019.
- Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N. and Belward, A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 2016, 540, 418–422.
- Souza, C.M., Kirchhoff, F.T., Oliveira, B.C., Ribeiro, J.G. and 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, 566.
- WWF. 2020. *Living Planet Report 2020: Bending the curve of biodiversity loss*. Almond, R.E.A., Grooten, M., & Petersen, T. (Eds). World Wide Fund for Nature, Gland, Switzerland.