

RAISG

RED AMAZÓNICA DE INFORMACIÓN
SOCIOAMBIENTAL GEORREFERENCIADA



MAPBIOMAS
[AMAZONIA]

Apéndice - Glaciares

Tema transversal en Colección 3.0 Versión 1

Responsable

Nelly Rivero

Colaboración

Anderson Albarrán

Gilberto Hernández

Índice

Resumen	3
1. Introducción	4
1.1 Alcance	5
1.2 Diagnóstico del problema	5
1.3 Área de Estudio	5
1.4 Glaciares principales y su cronología de desaparición	6
2. Metodología	7
2.1 Flujo metodológico	7
2.2 Mosaicos de imágenes	8
2.3 Clasificación	8
2.3.1 Variables de clasificación	9
2.3.2 Mapas de referencia	9
2.3.3 Mapas de referencia	9
2.4 Post-clasificación	10
2.4.1 Llenado de vacíos de información (Gap Fill)	10
2.4.2 Filtro temporal	10
2.4.3 Filtro espacial	11
2.4.4 Filtro de frecuencia y permanencia temporal	12
2.5 Integración con las otras clases MapBiomias	12
2.6 Validación	12
2.6.1 Diseño de muestreo	12
Referencias	14

Resumen

Wataniba (Grupo de Trabajo Socioambiental para la Amazonía) es una organización de la sociedad civil venezolana fundada en 2005 que promueve procesos de gestión territorial sostenibles en la Amazonía. Como miembro de la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG) desde 2017, Wataniba participa activamente en la generación de información geoespacial para el monitoreo ambiental en la cuenca amazónica.

En el marco de MapBiomias Venezuela, iniciativa co-creada por Provita, Wataniba, LSIGMA-USB y RAISG, Wataniba coordina técnicamente dos componentes fundamentales: MapBiomias Agua Venezuela y participa en la adaptación de la metodología de mapeo de glaciares tropicales al contexto venezolano.

Desde 2009, en el marco del trabajo con la RAISG, se inició la construcción de mapas de deforestación de la Amazonía venezolana aplicando herramientas de procesamiento de datos satelitales cada vez más avanzadas. En búsqueda de nuevas alternativas para la automatización de los procesos y la generación de información temporalmente oportuna, en 2021 la RAISG, en acuerdo con la Coordinación General de MapBiomias Network, crea la iniciativa MapBiomias Venezuela, de la que Wataniba es miembro fundador.

MapBiomias Agua Venezuela, mapea y monitorea la superficie de agua en Venezuela (ríos, lagos, lagunas, embalses, humedales) desde 1985 hasta 2024. Los datos revelan tendencias críticas de reducción de superficie de agua, con una pérdida de 66 mil hectáreas entre 2013 y 2021, formando parte de una crisis hídrica regional sostenida de más de ocho años. El componente de glaciares documenta un caso único en la historia glaciológica moderna: Venezuela se convirtió en 2024 en el primer país andino en perder todos sus glaciares. El último glaciar, ubicado en el Pico Humboldt (4,942 msnm), se redujo de 337.4 hectáreas (1910) a menos de 2 hectáreas (2024), representando una pérdida del 99%. Este mapeo retrospectivo (1985-2024) es fundamental para preservar el registro histórico y proporcionar evidencia del cambio climático.

El objetivo de este Documento Base Teórico de Algoritmos (ATBD) es proporcionar a los usuarios la comprensión de los pasos metodológicos y algoritmos computacionales para producir la Colección 3.0 de mapas anuales de superficie de agua y glaciares en Venezuela entre 1985 y 2024, utilizando técnicas de teledetección, aprendizaje automático y procesamiento automatizado en la plataforma Google Earth Engine.

1. Introducción

La cartografía de glaciares es inherentemente difícil y peligrosa debido a la lejanía y la inaccesibilidad del terreno, así como a los desafíos asociados a la realización de trabajo de campo extensivo en ambientes de alta montaña. En el caso específico de Venezuela, se encontraban principalmente en el Parque Nacional Sierra Nevada de Mérida entre los 4.700 y 4.978 msnm, en zonas de difícil acceso que históricamente han limitado la frecuencia y cobertura espacial de los estudios de campo. Además, las condiciones climáticas adversas (temperaturas bajo cero, vientos fuertes, precipitación nival, radiación solar intensa), el riesgo de grietas ocultas bajo la nieve, el peligro de avalanchas y la posibilidad de mal de altura (soroche) convierten el trabajo de campo glaciológico en una actividad de alto riesgo que requiere protocolos estrictos de seguridad.

La delimitación precisa de los bordes glaciares mediante métodos tradicionales de campo es además una tarea compleja y subjetiva. Los límites entre hielo glaciar, nieve estacional, detritos superficiales (morrenas) y afloramientos rocosos suelen ser difusos y variables temporalmente, requiriendo criterios de interpretación consistentes y repetibilidad de mediciones. En glaciares muy pequeños como los venezolanos en sus últimas décadas de existencia (<10 hectáreas después de 2015), la identificación del límite entre hielo glaciar permanente y nieve estacional se vuelve particularmente crítica, especialmente considerando que la definición formal de glaciar requiere que la masa de hielo sea lo suficientemente gruesa y extensa para moverse bajo su propio peso, criterio que el remanente del Pico Humboldt dejó de cumplir hacia 2024, siendo reclasificado como "campo de hielo".

En este contexto, la teledetección ofrece ventajas fundamentales: cobertura espacial completa y sistemática de todos los glaciares de una región, series temporales largas y consistentes (programa Landsat desde 1972), revisita temporal regular (cada 16 días para Landsat), acceso gratuito a datos históricos y actuales (política de datos abiertos de USGS desde 2008), procesamiento automatizado mediante algoritmos reproducibles, y costos marginales prácticamente nulos una vez desarrollada la metodología. La selección juiciosa de bandas espectrales es fundamental en el mapeo de características glaciares: el hielo y la nieve presentan alta reflectancia en el espectro visible y baja reflectancia en el infrarrojo de onda corta (SWIR)¹, propiedad que permite calcular el índice NDSI (Normalized Difference Snow Index) como $(\text{Verde} - \text{SWIR1}) / (\text{Verde} + \text{SWIR1})$, que maximiza la separabilidad entre nieve/hielo y otras coberturas como nubes, rocas o vegetación, bajo el entrenamiento continuo del algoritmo para detectar de manera adecuada la superficie de hielo²

Sin embargo, la teledetección de glaciares también enfrenta desafíos significativos. La cobertura de nubes en regiones tropicales de montaña puede limitar la disponibilidad de imágenes claras, especialmente durante la estación húmeda. La diferenciación entre nieve estacional y hielo glaciar permanente requiere análisis multitemporal cuidadoso, utilizando composiciones de época seca (diciembre-marzo en Venezuela) para minimizar la confusión con nieve temporal. Para glaciares muy pequeños como los venezolanos en sus últimas décadas (<5 hectáreas), la resolución espacial de Landsat (30 metros) presenta limitaciones: un glaciar de 4.5 hectáreas (como el Humboldt en 2019) equivale a apenas ~50 píxeles, donde errores de georreferenciación de 1-2 píxeles o errores de clasificación pueden generar incertidumbres significativas en la estimación del área^{3;4;5}.

En este contexto, MapBiomias Venezuela surge como una iniciativa colaborativa que busca generar información robusta, accesible y actualizada sobre el mapeo retrospectivo de superficie glaciares como componentes estratégicos del ciclo hidrológico nacional. El presente Documento Base Teórico de Algoritmos (ATBD) describe la metodología aplicada para la generación de los mapas anuales de superficie de glaciares correspondientes a la Colección 3 de MapBiomias Agua - Venezuela,

¹ Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22

² Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127-140.

³ Racoviteanu, A. E., et al. (2008). Challenges in glacier mapping from space. En: *Global Land Ice Measurements from Space*. Springer.

⁴ Rabatel, A., et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7, 81-102.

⁵ Braun, C., & Bezada, M. (2013). The history and disappearance of glaciers in Venezuela. *Journal of Latin American Geography*.

que abarca el período 1985-2024. Este documento tiene como objetivo proporcionar a usuarios, investigadores y tomadores de decisiones una comprensión clara y transparente de los fundamentos conceptuales, procedimientos técnicos y algoritmos computacionales empleados en la producción de estos mapas, asegurando la replicabilidad, trazabilidad y mejora continua de los productos generados.

La metodología se fundamenta en el procesamiento automatizado de imágenes satelitales Landsat mediante algoritmos de clasificación supervisada implementados en la plataforma Google Earth Engine, aprovechando las propiedades espectrales distintivas del agua y el hielo glaciar en el espectro electromagnético. Para el mapeo de agua superficial, se utilizan índices espectrales como el NDWI y MNDWI que explotan la alta absorción del agua en las bandas del infrarrojo, mientras que para glaciares se emplea el NDSI, que diferencia nieve y hielo de otras coberturas mediante la combinación de bandas visible-verde e infrarrojo de onda corta.

1.1 Alcance

El objetivo de este documento es describir la base teórica, la justificación y los métodos aplicados para producir mapas anuales de superficie de agua sólida (glaciares) desde el año 1985 hasta 2024 de la Colección 3 de MapBiomias Venezuela. Este documento cubre los métodos de clasificación de imágenes Landsat (L4, L5, L7, L8, L9), la arquitectura de procesamiento de imágenes en Google Earth Engine y el enfoque para mapear componentes críticos del ciclo hidrológico del territorio andino. También se presenta un contexto histórico y antecedentes, así como una descripción general del conjunto de datos de imágenes satelitales y del método de evaluación de precisión aplicado. Los algoritmos de clasificación estarán disponibles en el repositorio GitHub de MapBiomias Venezuela. Los mapas, estadísticas y productos derivados están disponibles en la plataforma web de MapBiomias Venezuela (<https://venezuela.mapbiomas.org>) para consulta y descarga gratuita.

1.2 Diagnóstico del problema

El componente de glaciares documenta un caso único y emblemático: Venezuela se convirtió en 2024 en el primer país andino y tropical en perder todos sus glaciares. Una situación particularmente dramática, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) confirmó que Venezuela, junto con Eslovenia, son los dos únicos países del mundo en perder todos sus glaciares en la época moderna. El último glaciar del Pico Humboldt se redujo de 337.4 hectáreas en 1910 a menos de 2 hectáreas en 2024, representando una pérdida del 99% documentada exhaustivamente mediante la aplicación de técnicas de teledetección satelital, algo que hubiera sido imposible de registrar con la misma precisión espacial y continuidad temporal mediante métodos tradicionales de campo.

¿Y por qué aún sigue siendo importante estudiar esta superficie en Venezuela? Aunque los glaciares venezolanos han desaparecido funcionalmente, el mapeo retrospectivo es fundamental para preservar el registro histórico, generar evidencia del cambio climático, advertir a otros países andinos donde los glaciares también retroceden aceleradamente, y comprender la formación de nuevos ecosistemas en zonas de retroceso glaciar.

La coordinación técnica de este componente de glaciares dentro de MapBiomias enmarca en su trayectoria como miembro de la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG) y su compromiso con la generación de información socioambiental de acceso público que apoye la gestión territorial sostenible. El equipo técnico de la organización participa en la adaptación de metodologías de mapeo de glaciares al contexto venezolano.

1.3 Área de Estudio

El área de trabajo para el mapeo de glaciares se circunscribe exclusivamente a la Sierra Nevada de Mérida, ubicada en el estado Mérida, al suroeste de Venezuela, en la región andina del país. Geográficamente, el área de estudio se delimita aproximadamente entre las

coordenadas 8° 25'N - 8° 33'N y 71° 03'W - 71° 31'W.

Esta región forma parte del **Parque Nacional Sierra Nevada** (creado en 1952), abarcando las zonas de alta montaña por encima de los **4,200 metros sobre el nivel del mar**, donde históricamente se localizaron los glaciares venezolanos. El área específica de análisis incluye:

- ✓ **Pico Humboldt** (4,942 msnm) y sus zonas circundantes
- ✓ **Pico Bolívar** (4,978 msnm, el más alto de Venezuela)
- ✓ **Pico Bonpland** (4,883 msnm)
- ✓ **Pico La Concha** (4,922 msnm)
- ✓ **Pico El Toro** (4,758 msnm)

Adicionalmente, el área de trabajo incluye un **buffer de seguridad de aproximadamente 1.5 km** alrededor de las zonas históricas con glaciares para asegurar la captura completa de la dinámica de retroceso glacial y las zonas de sucesión primaria (áreas recientemente expuestas por la retirada del hielo). Este buffer permite documentar las transiciones entre cobertura glacial, afloramientos rocosos recién expuestos y vegetación de páramo que coloniza las zonas post-glaciares.

El análisis se concentra en el rango altitudinal entre **4,200 y 4,978 msnm**, aunque con énfasis particular en zonas por encima de **4,700 msnm** donde se localizaron los glaciares durante el período 1985-2024.

1.4 Glaciares principales y su cronología de desaparición

Los glaciares venezolanos han experimentado una de las tasas de retroceso más aceleradas documentadas en los Andes tropicales. Entre 1910 y 2019, el área glacial se redujo en un 98,6% pasando de 337.4 hectáreas a apenas 4.54 hectáreas ^{[4] [5]}. El proceso se aceleró dramáticamente en las últimas décadas: entre 2016 y 2019, la tasa de pérdida promedio fue de 16.9% anual, equivalente a 23.3 metros por año de retroceso del borde terminal del glaciar y 6.7 metros por año de retroceso en elevación ^[4].

El glaciar Humboldt fue el último en subsistir, en parte debido a su altitud y topografía favorable. Se asentaba en una pendiente suavemente inclinada (menor de 15°) en la ladera noroeste del Pico Humboldt, donde la nieve podía acumularse y compactarse en hielo glacial^{6;7}. Sin embargo, estas características no fueron suficientes para sostenerlo indefinidamente frente al cambio climático acelerado.

Tabla 1. Cronología de desaparición de glaciares en Venezuela.

Glaciar	Altitud (msnm)	Ubicación	Área 1910 (ha)	Área 1952 (ha)	Área 2009 (ha)	Año de desaparición	Estado actual
Pico Humboldt	4,942	8° 33'10.6"N , 71° 3'11.7"W	337.4*	127.3	16.4	2024 (funcional)	Campo de hielo <2 ha**
Pico Bolívar	4,978	Cerca del Pico Espejo	Parte de masa continua	60.1	11.0	2020	Desaparecido o totalmente
Pico La Concha	4,922	Sierra Nevada de Mérida	37.9	4.7	-	1990	Desaparecido o totalmente

⁶ Llambí, L.D., Melfo, A., & Santos, T. (2021). Los Andes Después del Hielo: El último Glaciar de Venezuela. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas - ICAE, Universidad de los Andes. Propuestas Andinas No. 17. CONDESAN.

⁷ NASA Earth Observatory. (2024). Humboldt Glacier's Demise. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/152893/humboldt-glacier-s-demise>

Pico Bonpland	4,883	Norte del Pico Humboldt	Conectado con Humboldt	-	-	~2009	Desaparecido o totalmente
Pico El Toro	4,758	Sierra Nevada de Mérida	Datos no disponibles	-	-	~1900-1910	Desaparecido o totalmente

Fuentes: Llambí et al. 2021; Ramírez et al. 2020; NASA 2024; BBC Mundo 2024.

Notas:(*) Área de 1910 incluye extensión compartida entre Pico Humboldt y Pico Bonpland; (**) El glaciar "La Corona" (Pico Humboldt) fue el último glaciar venezolano, En 2024 fue reclasificado como "campo de hielo" por no cumplir criterios glaciológicos (movimiento por gravedad)

2. Metodología

El procedimiento es un método estandarizado desarrollado para el mapeo de glaciares, labor que en un principio abarcó toda aquella superficie que tuviera conectividad con la amazonia, y que a posterior se fue expandiendo a los países de la región. Esta metodología mantiene los procedimientos técnicos, algoritmos de clasificación, filtros de post- procesamiento y protocolos de validación son aplicables independientemente del tamaño o estado actual de los glaciares.

Sin embargo, es fundamental reconocer que en el contexto venezolano:

1. El análisis se enfoca primordialmente en la reconstrucción retrospectiva (1985-2024)
2. Los resultados para años recientes (2020-2024) mostrarán ausencia o presencia mínima de cobertura glaciar.
3. La metodología permite documentar la transición de "glaciar activo" a "campo de hielo" y finalmente, a "ausencia de glaciar".

A pesar de la extinción de los glaciares venezolanos, mantener la metodología estándar es esencial para en principio generar series temporales consistentes y comparables con otros países andinos; aplicar criterios homogéneos de clasificación en toda la región amazónica-andina; luego, permitir análisis comparativos de tasas de retroceso glaciar; y por último proveer datos históricos confiables para estudios de cambio climático.

2.1 Flujo metodológico

En este documento, presentamos una descripción de la metodología aplicada para el mapeo de la superficie de agua sólida (glaciares) para la colección 3 de MapBiomias Agua Venezuela para ello se ha usado como base la metodología aplicada por la red MapBiomias (Turpo Cayo et al., 2022). El proceso completo se dividió en 6 etapas figura 1.

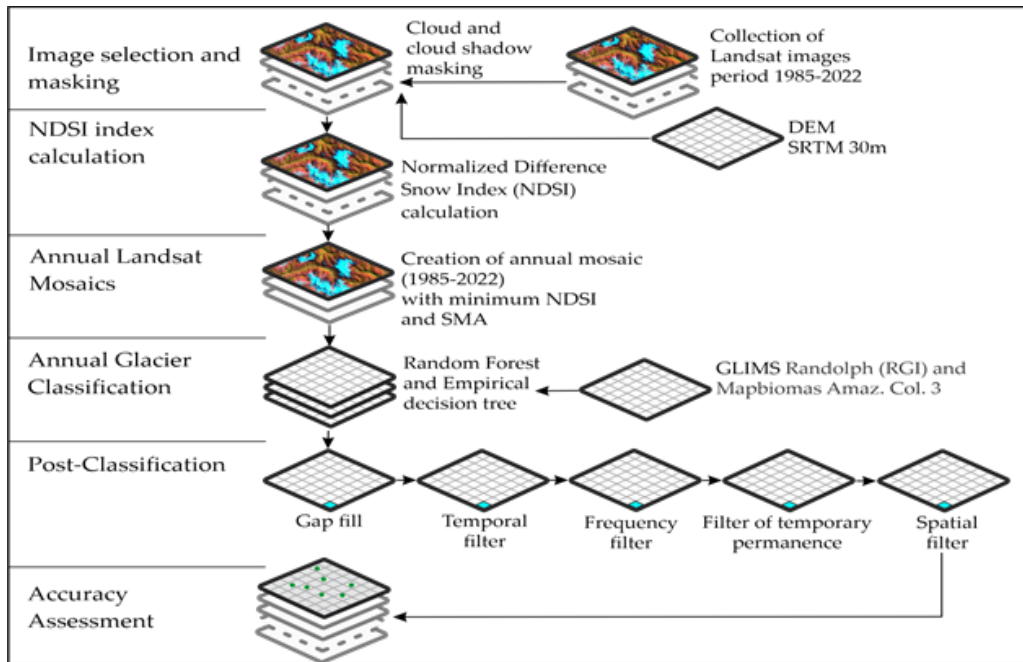


Figura 1 - Diagrama de flujo metodológico para la obtención de mapas de coberturas Glaciares

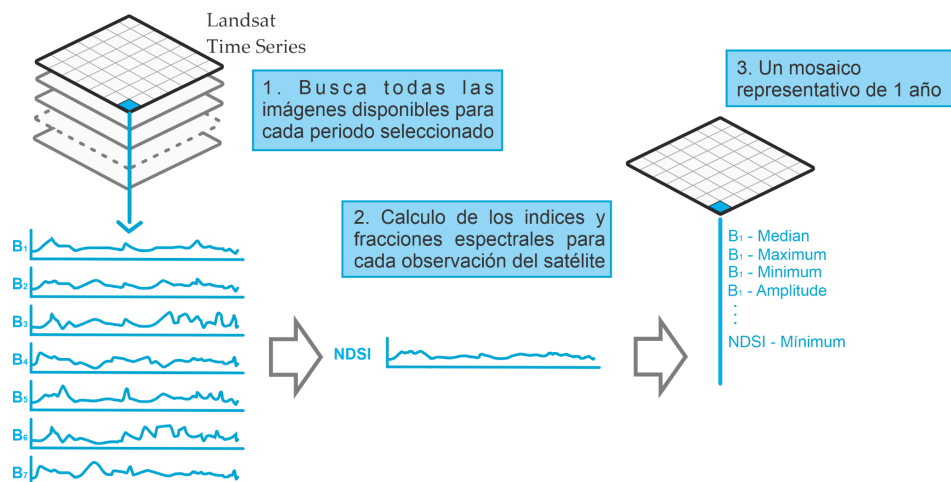
2.2 Mosaicos de imágenes

La clasificación del tema transversal “Glaciares” utilizó los mosaicos de imágenes Landsat generados específicamente para el mapeo de glaciares. Estos mosaicos contemplaban las imágenes con área glaciaria mínima anual, basado en el píxel de calidad de NDSI mínimo.

Criterios de selección de imágenes:

- ✓ Utilización de imágenes Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI).
 - ✓ Selección basada en índice NDSI para identificar cobertura nival y glaciaria.
 - ✓ Uso de percentil 75 y percentil 25 del NDSI para estaciones húmedas y secas respectivamente
- Minimización de cobertura de nubes mediante algoritmos de enmascaramiento

Figura 2 - Creación de mosaicos anuales para Glaciares.



2.3 Clasificación

La clasificación de los mosaicos Landsat se realizó íntegramente en la plataforma Google Earth Engine, basada en un árbol empírico figura 3. donde los valores de reflectancia NIR median son próximos a 0.2114 en Landsat 5 y Landsat 7, mientras que en Landsat 8 valores son próximos a 0.1730. En el caso de RED median se usó valores 0.2497, 0.2497 y 0.2304 para Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 respectivamente.

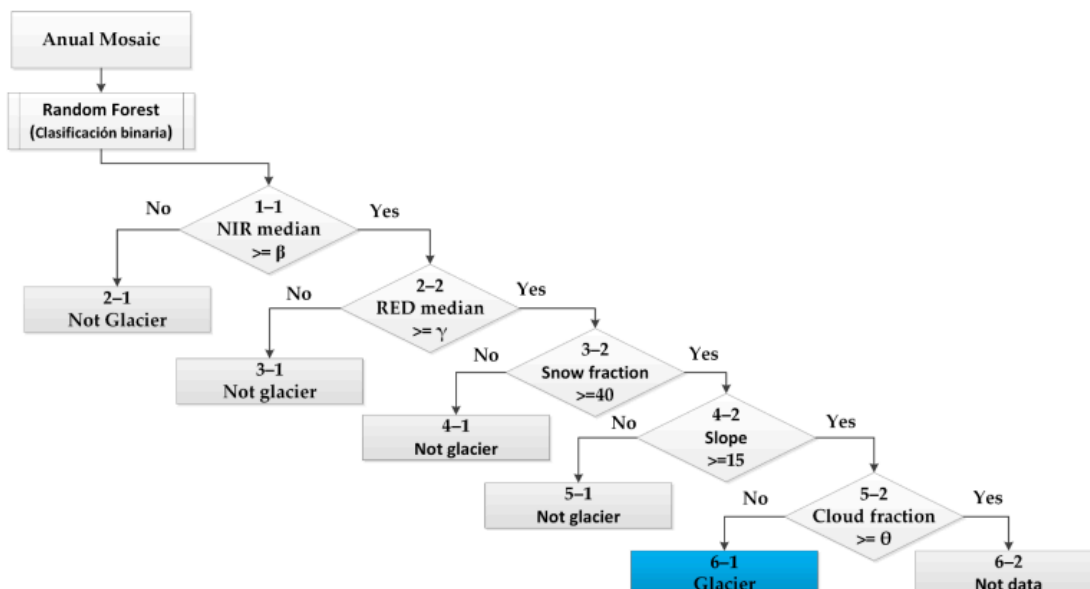


Figura 3: Árbol empírico combinado con Random forest para clasificación de Glaciares

Umbral de clasificación:

- ✓ NIR median: -0.2114 (Landsat 5/7); -0.1730 (Landsat 8)
- ✓ RED median: -0.2497 (Landsat 5/7); -0.2304 (Landsat 8)

2.3.1 Variables de clasificación

Tabla 4. Índices espectrales y bandas utilizadas para la clasificación.

Tipo	nombre	Fórmula	Descripción	Reductor				
				Media n	Median_dry	Median_wet	Mín	Max
Banda	blue	B1 (L5 y L7); B2 (L8)	Espectro visible azul		X			
	green	B2 (L5 y L7); B3 (L8)	Espectro visible verde		X			
	red	B3 (L5 y L7); B4 (L8)	Espectro visible rojo	X	X			
	nir	B4 (L5 y L7); B5 (L8)	Infrarrojo cercano	X	X			
	swir1	B5 (L5 y L7); B6 (L8)	Infrarrojo de onda corta 1		X			
	swir2	B7 (L5); B8 (L7); B7(L8)	Infrarrojo de onda corta 2		X			
Índices	ndsi	$(\text{green} - \text{swir1}) / (\text{green} + \text{swir1})$	Índice Diferencial Normalizado de Nieve				X	
fracciónes	cloud fracción	SMA	Fracción de nube		X			
	cloud Snow	SMA	Fracción de nieve		X			

2.3.2 Mapas de referencia

El área de estudio se define basado en el Inventario de Glaciares de Global Land Ice Measurements from Space (2022), complementado con inspección visual y agregación de glaciares faltantes documentados en la literatura científica venezolana, específicamente:

- ✓ Mapas históricos de Alfredo Jahn (1910)
- ✓ Fotografías aéreas de 1952
- ✓ Estudios de la Universidad de Los Andes ^{1;2}
- ✓ Proyecto "Último Glaciar de Venezuela" (2019) ^{8;9}

⁸ Llambí, L.D., et al. (2021). Vegetation Assembly, Adaptive Strategies and Positive Interactions During Primary Succession in the Forefield of the Last Venezuelan Glacier. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 857755.

⁹ Llambí, L.D., et al. (2024). Monitoreo de la Sucesión Primaria en el Último Glaciar de Venezuela. Proyecto Último Glaciar Venezuela, ICAE-ULA, National Geographic Society.



Figura 4 - Distribución de glaciares en Suramerica, fuente: (Global Land Ice Measurements from Space, 2022)

2.3.3 Mapas de referencia

Para el caso venezolano, las muestras de entrenamiento se realizaron con la intención de discriminar las respuestas espectrales de las masas de hielo, del resto de las superficies cercanas que poseen reflectancia similares deben incluir:

- ✓ Puntos de referencia de glaciares en años históricos (1985-2010)
- ✓ Puntos de transición glaciar-nieve estacional (2010-2020)

- ✓ Puntos de zonas de retroceso glaciar reciente
- ✓ Puntos de validación negativa (roca expuesta, vegetación de alta montaña)

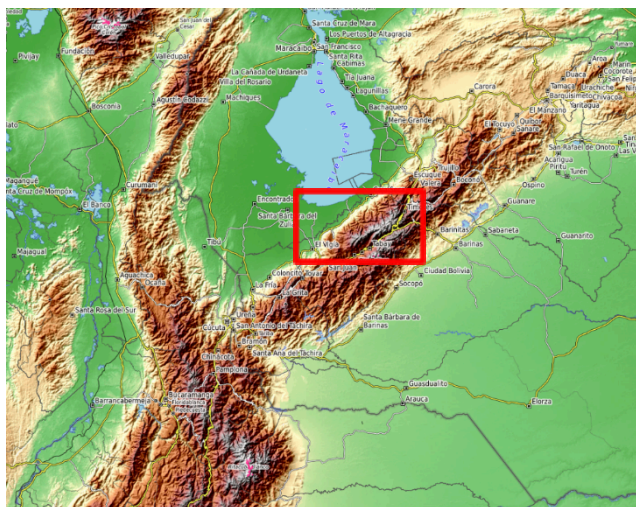
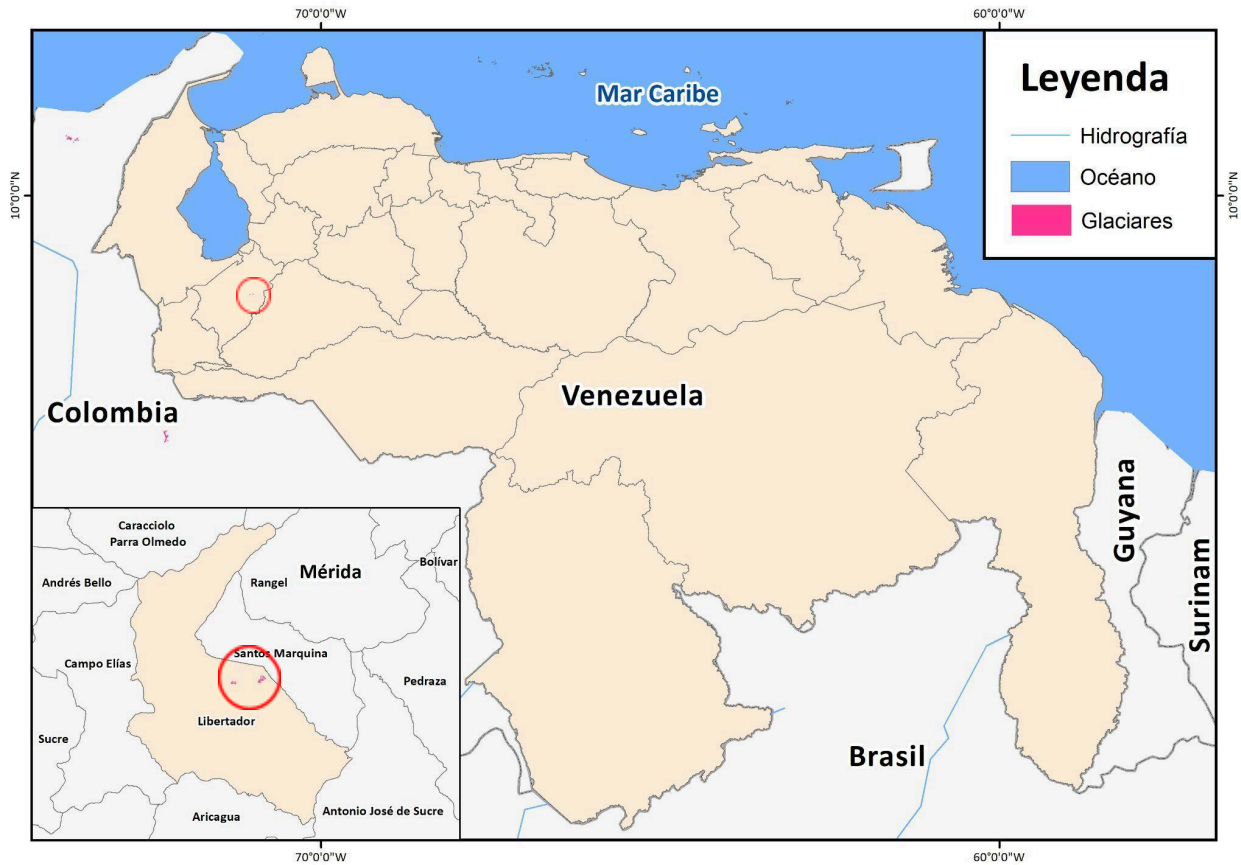


Figura 5 - Distribución de glaciares del extremo del occidente del país, Fuente: [Visor de los Glaciares del Mundo](#) | [Visores Cartográficos](#) | [Meteosierra](#)

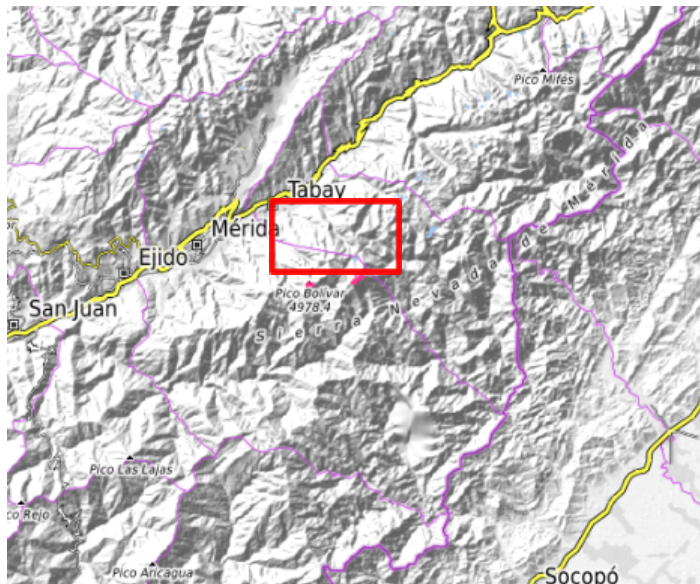


Figura 6 - Distribución de glaciares del extremo del occidente del país, Fuente: [Visor de los Glaciares del Mundo | Visores Cartográficos | Meteosierra](#)

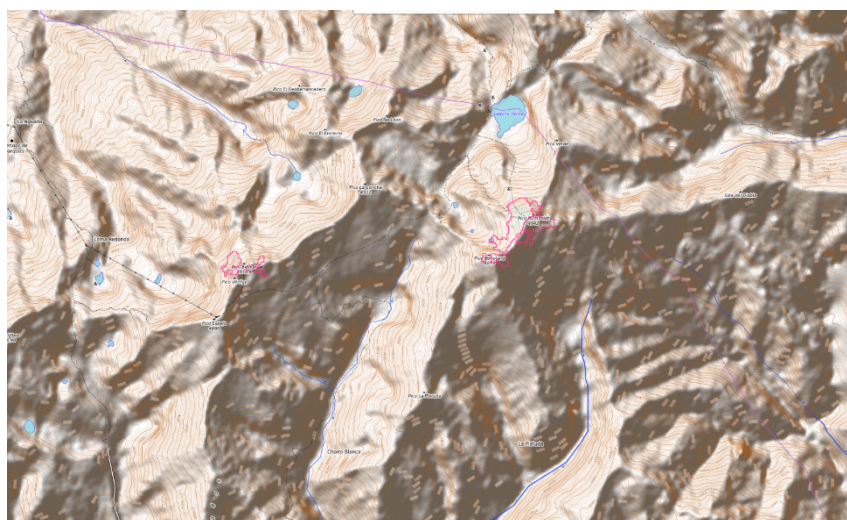


Figura 7 - Distribución de glaciares de Mérida, Fuente: [Visor de los Glaciares del Mundo | Visores Cartográficos | Meteosierra](#)

2.4 Post-clasificación

Debido a la naturaleza basada en píxeles del método de clasificación y el trabajo sobre una serie temporal extensa, se aplicó una cadena de filtros post clasificación. El proceso de post clasificación incluye la aplicación de filtros de relleno, temporal, espacial y de frecuencia.

2.4.1 Llenado de vacíos de información (Gap Fill)

En una serie temporal larga de regiones severamente afectadas por nubes, pueden ocurrir vacíos en el resultado de la clasificación. Con el Gap Fill, los vacíos son reemplazados por la clasificación temporalmente más cercana. Si no hay disponibilidad de un valor en el año siguiente, el espacio se reemplaza con el valor del año precedente.

Con esto se garantiza que solo los píxeles que se han clasificado sin información en todos los años, se mantengan bajo ese mismo valor en todo el periodo temporal.

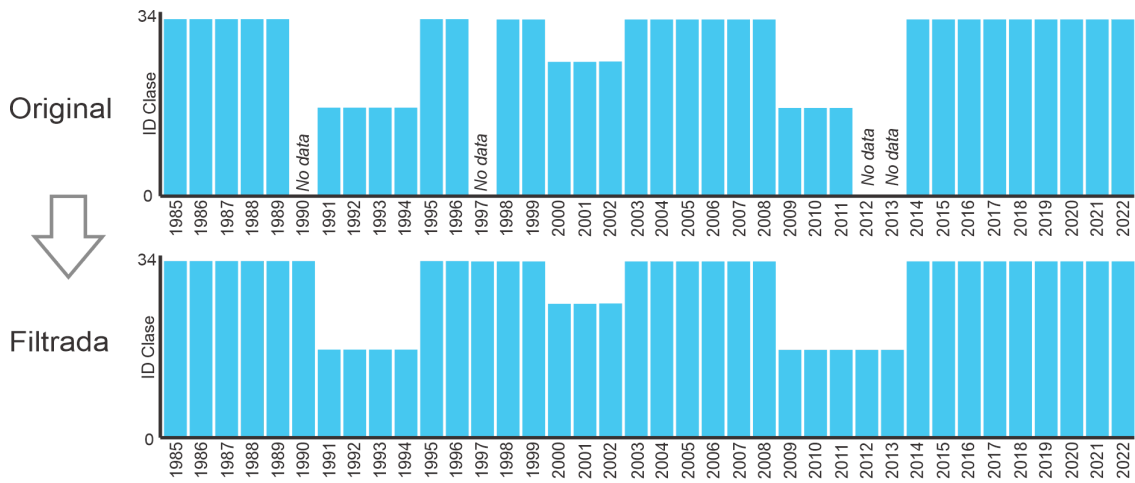


Figura 8 - Filtro Gap Fill

2.4.2 Filtro temporal

Una vez aplicado el Gap Fill, se ejecuta el filtro temporal, el cual utiliza clasificaciones secuenciales en una ventana móvil unidireccional de 3, 4 o 5 años para identificar transiciones temporalmente incoherentes, basado en reglas de: Años intermedios, primer y último año de la serie.

Debido a que existen datos de años faltantes por errores en la captura de información, es importante el uso de este filtro, especialmente para suavizar transiciones abruptas y no realistas en áreas de retroceso glaciar.

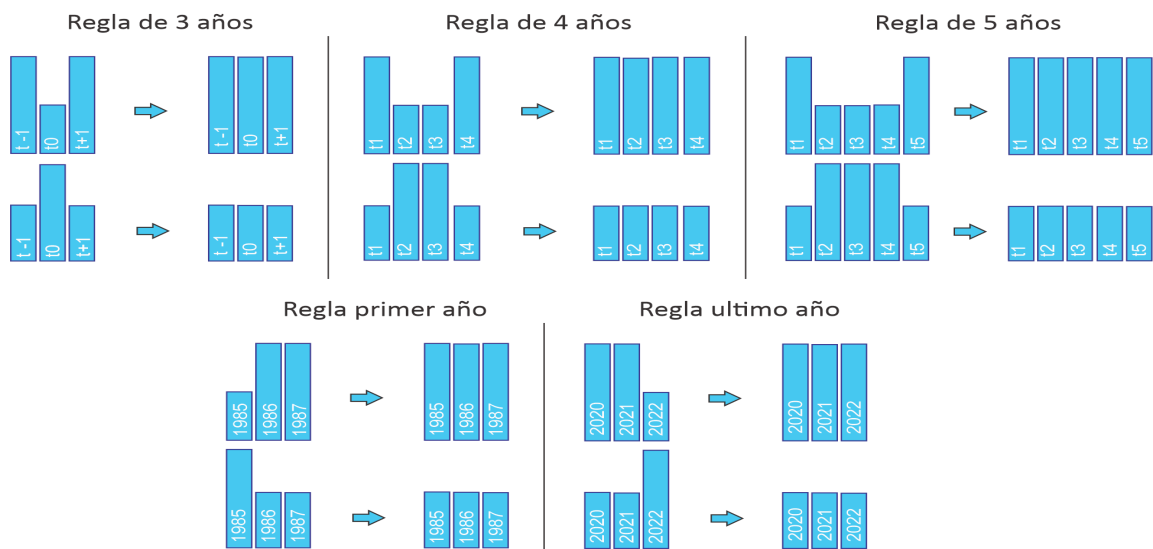
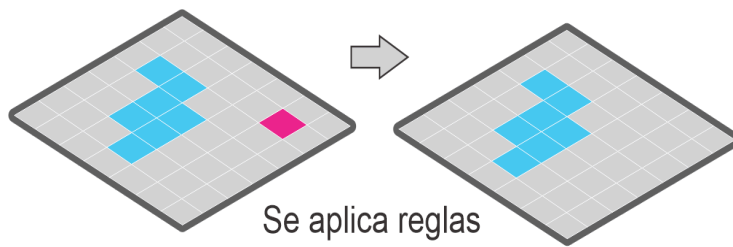


Figura 9- Filtro Temporal

2.4.3 Filtro espacial

Se aplica un filtro espacial basado en la función "connectedPixelCount", que identifica el conjunto de píxeles (vecindarios) que comparten un mismo valor. A razón de esto, solo los píxeles que no presentan conexión considerando una cantidad mínima predefinida de píxeles idénticos son definidos como píxeles aislados y reclasificados.



Se aplica reglas de vecindad
 $\# \text{ de pixeles vecinos} < n$
 entonces substituir por la clase predominante

Figura 10 - Efecto de la aplicación del filtro espacial

2.4.4 Filtro de frecuencia y permanencia temporal

Este filtro considera la ocurrencia de la clase a lo largo de la serie temporal para limpiar el resultado de la clasificación, complementado con una regla de permanencia temporal.

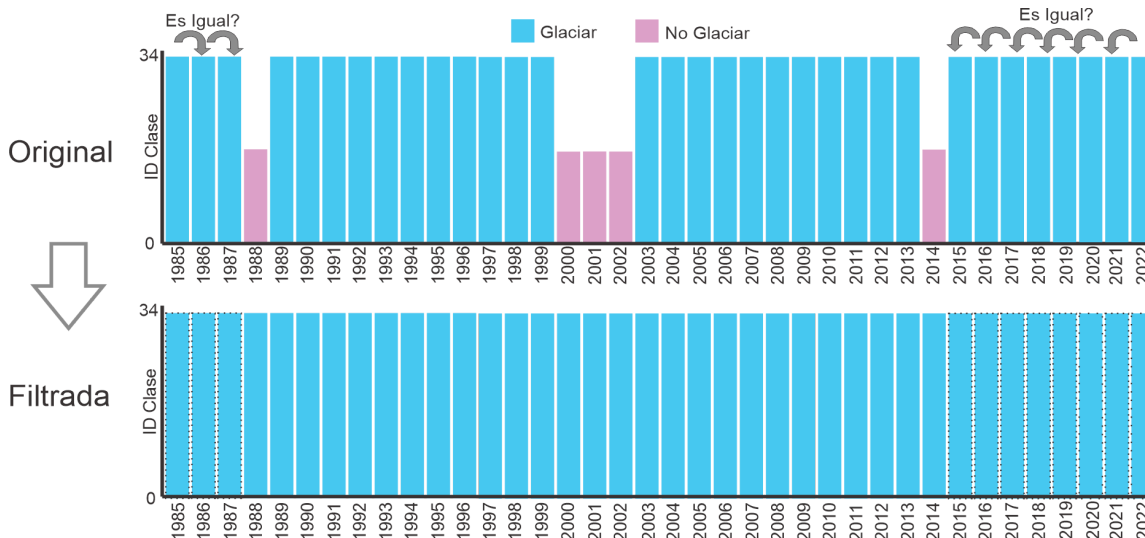


Figura 11 - Efecto de la aplicación del filtro de frecuencia



Figura 12 - Efecto de la aplicación del filtro de permanencia temporal

2.5 Integración con las otras clases MapBiomias

Luego de la aplicación de la secuencia de filtros en la etapa de Post clasificación, los temas transversales y los mapas generales de cada bioma son integrados. Esta integración depende de una serie de reglas jerárquicas específicas que asignan un orden de prevalencia a cada clase Tabla 1. Como resultado de esta integración se puede observar en los mapas anuales de cobertura y uso de la tierra de Venezuela, la superficie de agua sólida detectada.

Además, la data es publicada en el módulo Glaciares de MapBiomias Agua Venezuela. Es importante considerar que **para Venezuela** la integración debe considerar la transición de "glaciar" a "afloramiento rocoso" y eventualmente a "vegetación de alta montaña (páramo)" en las zonas de retroceso glaciar.

2.6 Validación

2.6.1 Diseño de muestreo

El análisis de precisión temática es la principal forma de evaluar la calidad de los mapas. El análisis de precisión considera un muestreo aleatorio estratificado.

Tamaño de muestra:

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 * p * q}{e^2}$$

Donde:

$z_{\alpha/2}$ = Se define según nivel de confianza (Tabla Z)

p = Probabilidad de éxito, o proporción esperada

q = Probabilidad de fracaso (100-p)

e = Precisión (error máximo admisible en términos de proporción)

Para Venezuela: Tomando un nivel de confianza del 95% ($Z = 1.96$); $p = 95\%$ y $e = 0.08$ se recomienda un mínimo de 200 puntos de validación distribuidos estratégicamente en:

- ✓ Zonas con glaciares históricos (1985-2010)
- ✓ Zonas de retroceso acelerado (2010-2020)
- ✓ Zonas de glaciar residual (2020-2024)

Referencias

- Batka, J., Vilímek, V., Štefanová, E., Cook, S. J., fi Emmer, A. (2020). Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) in the Cordillera Huayhuash, Peru: Historic Events and Current Susceptibility. *Water*, 12(10), 2664. <https://doi.org/10.3390/w12102664>
- Huang, L., Li, Z., Zhou, J. M., fi Zhang, P. (2021). An automatic method for clean glacier and nonseasonal snow area change estimation in High Mountain Asia from 1990 to 2018. *Remote Sensing of Environment*, 258, 112376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112376>
- Kaser, G., fi Osmaston, H. (2002). *Tropical glaciers*. Cambridge Univ. Press. <https://onggem.files.wordpress.com/2011/02/kaser-osmaston-2002-tropical-glaciers1.pdf>
- Philip, G., fi Ravindran, K. (1998). Glacial mapping using landsat thematic mapper data: A case study in parts of gangotri glacier, NW himalaya. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26(1-2), 29-34. <https://doi.org/10.1007/BF03007337>
- Racoviteanu, A. E., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S. J. S., fi Armstrong, R. (2009). Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, 50(53), 53-69. <https://doi.org/10.3189/172756410790595804>
- RGI Consortium. (2017). Randolph Glacier Inventory - A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. En *GLIMS Technical Report*. https://www.glims.org/RGI/00_rgi60_TechnicalNote.pdf
- Turpo Cayo, E. Y., Borja, M. O., Espinoza-Villar, R., Moreno, N., Camargo, R., Almeida, C., Hopfgartner, K., Yarleque, C., fi 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), 1974. <https://doi.org/10.3390/rs14091974>
- Veetil fi Kamp. (2019). Global Disappearance of Tropical Mountain Glaciers: Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences*, 9(5), 196. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>