

ISSN: 3115-3178
Primera edición, 2026

I Simposio de Ciencias de la Criosfera



I Simposio de Ciencias de la Criosfera

Primera edición, 2026

ISSN: 3115-3178

Yiniva Camargo Caicedo
Directora

Angie García Cataño
Eliana Ramírez Romero
Compiladores

Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales – GIMSA

Facultad de Ingeniería
Universidad del Magdalena
Carrera 32 N° 22 – 08, Santa Marta, Magdalena, Colombia
www.unimagdalena.edu.co

Publicación disponible en:

<https://investigacion.unimagdalena.edu.co/Publicaciones/Ver/1164>

© 2026 Universidad del Magdalena. Todos los derechos reservados

Se permite la reproducción parcial para fines académicos y no comerciales, citando la fuente.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	3
Lista de figura	5
Lista de tablas	7
Prólogo	8
Introducción	14
Monitoreo y observación de la atmósfera	15
Monitoreo y Balance de Masa Glaciar en Colombia ¿cómo interpretar a nuestros glaciares?	15
<i>Jorge Ceballos Liévano</i>	
Uso de imágenes satelitales PlanetScope para la estimación del área glaciar en Colombia	23
<i>Andrés Cruz Mendoza</i>	
Monitoreo glaciológico del Nevado Chachacomani (Bolivia): resultados preliminares 2018–2022	27
<i>Davide Vitale, Miriam Campoleoni</i>	
Modelación de la incidencia de partículas absorbentes de luz en la Sierra Nevada del Cocuy.....	30
<i>Gladis Loaiza Rada</i>	
Black Carbon	35
Efecto comparativo de la temperatura, carbono negro y polvo en la reducción del albedo en el glaciar Sierra Nevada El Cocuy (2000–2023)	35
<i>Fredy Arid Tovar Bernal, Tomás Bolaño Ortiz, Magin Lapuerta</i>	
Incidencia del Black Carbon (BC) en los mantos nevados y su modelación en OptiPar .	38
<i>Eduardo Fontanilla Amaya</i>	
Cambio climático y retroceso glaciar en la cordillera blanca.....	43
<i>Luzmila Davila Roller</i>	
Cambio climático	50

Más allá del análisis satelital: Desafíos y oportunidades metodológicos en la caracterización de incendios en ecosistemas de alta montaña, Colombia, revisión sistémica de evidencias.....	50
--	----

Sindy Bolaño-Díaz; Geraldine M. Pomares-Meza

Lista de figura

Monitoreo y Balance de Masa Glaciar en Colombia ¿cómo interpretar a nuestros glaciares?

Figura 1. Esquema de la Línea de Equilibrio Altitudinal (ELA) y su variación histórica. Fuente: IDEAM.	16
Figura 2. Esquema de medición con balizas o estacas para el cálculo del balance de masa. Fuente: IDEAM.	17
Figura 3. Red de balizas en el glaciar (puntos amarillos). Fuente: IDEAM	18
Figura 4. Balance de masa glaciar Ritacuba Blanco, Sierra Nevada El Cocuy o Güicán. Fuente: IDEAM.	19
Figura 5. Balance de masa glaciar Conejeras, Nevado Santa Isabel. Fuente: IDEAM	20
Figura 6. Cambio anual de masa de glaciares de referencia mundiales (WGMS). Fuente: IDEAM / WGMS.....	20
Figura 7. Comparación fotográfica del Glaciar Santa Isabel, sector El Hongo (2017 vs. 2024). Fuente: IDEAM.	21

Modelación de la incidencia de partículas absorbentes de luz en la Sierra Nevada del Cocuy

Figura 1. Valores de albedo nieve variando la concentración de BC en el programa de OptiPar.	32
Figura 2. Valores de albedo nieve variando la concentración de polvo en el programa de OptiPar.	33
Figura 3. Valores de albedo de nieve con concentraciones de BC en los 3 programas.	33

Incidencia del Black Carbon (BC) en los mantos nevados y su modelación en OptiPar

Figura 1. Esquema del diagrama de flujo de la modelación en OptiPar en relación a estudio de aerosoles y manto de partículas.....	39
Figura 2. Resultados de albedo para un manto nevado simulado y proyectado desde la interfaz de OptiPar.	40
Figura 3. Albedo medio para un manto nevado en función al tamaño de grano de nieve y la concentración contaminante, simulado en OptiPar.	41

Cambio climático y retroceso glaciar en la cordillera blanca

Figura 1. Tipos de glaciares: libres de detritos, cubiertos de detritos y rocosos. Fuente: INAIGEM.....	44
Figura 2. Tipos de lagunas de origen glaciar: periglaciales, proglaciales y supraglaciales. Fuente: INAIGEM.	44

Figura 3. Pérdida de superficie glaciar a nivel nacional en los últimos 58 años.	
Fuente: INAIGEM.....	45
Figura 4. Pérdida de superficie glaciar por cordillera en 58 años.	46
Figura 5. Pérdida en la Cordillera Blanca	46
Figura 6. Pérdida de volumen glaciar: Glaciar Huilca	47
Figura 7. Pérdida de volumen glaciar: Glaciar Gueshgue.....	47

Más allá del análisis satelital: Desafíos y oportunidades metodológicos en la caracterización de incendios en ecosistemas de alta montaña, Colombia, revisión sistémica de evidencias.

Figura 1. Áreas de ecosistemas de páramo delimitados en Colombia.	51
Figura 2. Esquema temático de la revisión sistemática.	52

Lista de tablas

Monitoreo glaciológico del Nevado Chachacomani (Bolivia): resultados preliminares 2018–2022

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos. 28

Modelación de la incidencia de partículas absorbentes de luz en la Sierra Nevada del Cocuy

Tabla 1. Variables consideradas en el estudio 32

Más allá del análisis satelital: Desafíos y oportunidades metodológicos en la caracterización de incendios en ecosistemas de alta montaña, Colombia, revisión sistémica de evidencias.

Tabla 1. Matriz final de artículos filtrados a través de metodología PRISMA..... 53

Prólogo

Primer Simposio de Ciencias de la Criosfera es un volumen de memorias que reúne los trabajos presentados en este simposio, convocado y organizado por el Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales (GIMSA). El simposio congregó a investigadores, docentes y estudiantes de instituciones nacionales e internacionales en torno a un objetivo común: articular las principales líneas de investigación sobre la dinámica, el monitoreo y las implicaciones socioambientales de la criosfera en ambientes tropicales y de alta montaña. Las contribuciones aquí compiladas abordan desde el uso de tecnologías de teledetección de alta resolución para la cartografía glaciar, hasta la modelación del efecto de contaminantes atmosféricos sobre el albedo de la nieve, pasando por el análisis de los vínculos entre el retroceso glaciar, la disponibilidad hídrica y las comunidades que dependen de estos ecosistemas. En conjunto, este volumen constituye un aporte al conocimiento científico sobre uno de los componentes más vulnerables del sistema climático terrestre y una plataforma para el fortalecimiento de redes de investigación en ciencias de la criosfera en América Latina.

En el eje temático «*Monitoreo y observación de la criosfera*» se reúnen investigaciones orientadas al seguimiento sistemático de los glaciares mediante mediciones de campo, análisis geoespacial y técnicas de teledetección. La teledetección satelital se ha consolidado como herramienta indispensable para la delimitación y el análisis multitemporal de coberturas glaciares, especialmente ante las dificultades logísticas que impone el acceso a zonas de alta montaña (Paul et al., 2013). Sin embargo, la reducida extensión y la alta fragmentación de los glaciares tropicales plantean exigencias crecientes en términos de resolución espacial: sensores con píxeles de 30 metros, como Landsat, resultan insuficientes para la delimitación precisa de cuerpos glaciares menores a un kilómetro cuadrado (Rabatel et al., 2018). En este contexto, la incorporación de imágenes multispectrales de alta resolución, como las proporcionadas por la constelación PlanetScope (3 m), permite mejorar sustancialmente la precisión cartográfica y la detección de cambios en glaciares de pequeño tamaño. Los trabajos presentados en este eje documentan, entre otros hallazgos, que la superficie glaciar colombiana se ha reducido en más del 92 % desde mediados del siglo XIX, alcanzando apenas 30,83 km² en 2024 (Ceballos et al., 2025), y que el glaciar Chachacomani, en la Cordillera Real de Bolivia, perdió más de 36 millones de metros cúbicos de agua equivalente entre 2018 y 2022 (Servizio Glaciologico Lombardo, 2022). Estos resultados confirman la necesidad de combinar clasificación automatizada y delineación manual experta para reducir los errores asociados a sombras topográficas, detritos y depósitos de ceniza volcánica (Hall et al., 1987; Manoj et al., 2011).

En el eje temático «*Aguas, riesgo y comunidades*» se examinan las implicaciones hidrológicas y sociales del retroceso glaciar. Los glaciares tropicales cumplen una función

reguladora fundamental: amortiguan la variabilidad estacional de los caudales y garantizan el suministro de agua durante las temporadas secas, cuando otras fuentes superficiales se reducen (Vuille et al., 2018). Se estima que cerca de 78 millones de personas en los Andes tropicales dependen, en distintos grados, de los recursos hídricos aportados por los glaciares (Rabatel et al., 2013). Conforme los glaciares disminuyen de tamaño, el caudal glaciar puede aumentar transitoriamente —el denominado «pico hídrico» o *peak water*— antes de disminuir de manera irreversible a medida que la masa de hielo se agota (Huss y Hock, 2018). Este proceso compromete la seguridad hídrica de comunidades agrícolas y urbanas en valles interandinos, e incrementa al mismo tiempo el riesgo de eventos de remoción en masa y desbordamiento de lagunas glaciares de nueva formación (Carey et al., 2012). Los trabajos reunidos en este eje analizan tanto los mecanismos físicos de este tránsito hidrológico como las respuestas sociales e institucionales que demanda una gestión adaptativa del agua en territorios de montaña.

En el eje temático «*Cambio climático*» se presentan investigaciones que analizan los forzantes climáticos que impulsan el retroceso glaciar y la variabilidad del manto nival en los Andes. El calentamiento de la temperatura del aire en los Andes tropicales ha sido documentado desde finales del siglo XX, con tasas que superan el promedio global y que se acentúan con la altitud (Vuille y Bradley, 2000; Vuille et al., 2003). El fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) introduce una variabilidad interanual significativa sobre las precipitaciones y la temperatura en la región, con fases cálidas asociadas a déficits de acumulación y mayor ablación, y fases frías que pueden aportar acumulaciones importantes, aunque insuficientes para compensar la pérdida de masa a largo plazo (Jomelli et al., 2009). En los Andes centrales de Chile, la denominada «megasequía» —periodo extendido de déficit pluviométrico iniciado hacia 2010— ha reducido la precipitación entre un 25 % y un 45 % respecto a los promedios históricos (Garreaud et al., 2020), lo que ha deteriorado el manto de nieve y los niveles de los embalses de los que depende aproximadamente el 75 % de la población chilena. Las contribuciones de este eje integran observaciones satelitales MODIS, reanálisis MERRA-2 y registros terrestres para caracterizar tendencias de largo plazo en el albedo, la cobertura nival y los caudales, aportando evidencia robusta sobre el acoplamiento entre forzantes atmosféricos y respuesta criosférica en ambientes de alta montaña.

En el eje temático «*Black Carbon*» se abordan los efectos de las partículas absorbentes de luz (LAPs, por sus siglas en inglés) sobre las propiedades ópticas de la nieve y el hielo glaciar. El carbono negro (BC) es un contaminante de corta vida atmosférica pero de alto impacto climático: su forzamiento radiativo directo lo sitúa como el segundo agente de calentamiento más importante después del CO₂ (Bond et al., 2013). Cuando se deposita sobre superficies nevadas, el BC reduce el albedo, que en nieve fresca puede superar valores de 0,85, incrementando la absorción de radiación solar de onda corta y acelerando los procesos de fusión (Flanner et al., 2007; Hansen y Nazarenko, 2004). Esta retroalimentación positiva es particularmente relevante en glaciares tropicales, donde la alta insolación y los

estrechos márgenes de estabilidad energética hacen que pequeñas reducciones del albedo se traduzcan en pérdidas significativas de masa glaciar (Skiles et al., 2018). El polvo mineral de origen sahariano y local constituye un forzante adicional, con máximos estacionales asociados a temporadas secas e intrusiones de masas de aire continentales. Los trabajos de este eje, que emplean modelos de transferencia radiativa como SNICAR, SnowTARTES y OptiPar, demuestran que el incremento en la concentración de BC y polvo mineral genera reducciones del albedo estadísticamente significativas en la Sierra Nevada del Cocuy, y que la temperatura superficial, el BC y el polvo contribuyen de forma combinada —aunque en proporciones variables según la estación— a la reducción total del albedo observada entre 2000 y 2023 (Skiles et al., 2018; Hadley y Kirchstetter, 2012).

En el eje temático «*Innovación tecnológica para la criosfera*» se reúnen contribuciones que exploran el potencial de nuevas herramientas, sensores y metodologías para mejorar el monitoreo y la comprensión de los sistemas glaciares. La aceleración del retroceso glaciar y la creciente demanda de información precisa y oportuna han impulsado el desarrollo de plataformas de observación más densas y resolutivas. El uso combinado de sensores remotos de alta resolución, vehículos aéreos no tripulados (UAV), estaciones automáticas de meteorología glaciar y modelos de balance de masa de alta resolución amplía considerablemente las capacidades de detección temprana de cambios en la criosfera (Zemp et al., 2019). La integración de datos de múltiples fuentes —satelitales, de reanálisis y de campo— mediante técnicas de fusión de datos y aprendizaje automático representa una frontera metodológica en expansión que permite superar las limitaciones individuales de cada fuente de información (Immerzeel et al., 2020). Los trabajos presentados en este eje contribuyen a esta agenda mediante el desarrollo y la validación de metodologías que combinan procesamiento digital de imágenes, modelación radiativa y análisis estadístico multivariado, demostrando que la innovación tecnológica es un componente imprescindible de cualquier estrategia de monitoreo sostenible de la criosfera tropical.

Un rasgo que distingue este simposio es su vocación formativa. Diversas investigaciones aquí reunidas han involucrado activamente a estudiantes de pregrado y posgrado en trabajo de campo de alta montaña, procesamiento de datos y modelación, en línea con la convicción de que la producción de conocimiento científico riguroso es inseparable de la formación de las comunidades académicas que lo continuarán. Los vacíos identificados a lo largo del volumen —la necesidad de mayor resolución espacial y temporal en el monitoreo de glaciares altamente fragmentados, la integración de forzantes climáticos y antrópicos en modelos de balance de masa, la cuantificación in situ del depósito de carbono negro en glaciares tropicales colombianos, y el fortalecimiento de los vínculos entre ciencia glaciológica y gestión territorial del agua— configuran una agenda de investigación que este simposio contribuye a trazar. Los editores expresan su agradecimiento a los autores, evaluadores y participantes cuyo esfuerzo colectivo hizo posible este volumen, y confían en

que las contribuciones aquí reunidas estimulen nuevas preguntas y colaboraciones en torno a la comprensión y la protección de la criosfera andina y tropical.

Referencias

- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3–4), 733–767. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8>
- Ceballos Liévano, J. L., Cruz Mendoza, A. F., Martínez Serrano, S., & Zuluaga Cárdenas, L. C. (2025). *Informe del estado de los glaciares colombianos 2024*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- Flanner, M. G., Zender, C. S., Randerson, J. T., & Rasch, P. J. (2007). Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11), D11202. <https://doi.org/10.1029/2006JD008003>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Hadley, O. L., & Kirchstetter, T. W. (2012). Black-carbon reduction of snow albedo. *Nature Climate Change*, 2(6), 437–440. <https://doi.org/10.1038/nclimate1433>
- Hall, D. K., Ormsby, J. P., Bindshadler, R. A., & Siddalingaiah, H. (1987). Characterization of snow and ice reflectance zones on glaciers using Landsat Thematic Mapper data. *Annals of Glaciology*, 9, 104–108. <https://doi.org/10.3189/S0260305500000471>
- Hansen, J., & Nazarenko, L. (2004). Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(2), 423–428. <https://doi.org/10.1073/pnas.2237157100>
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., ... Baillie, J. E. M. (2020). Importance and vulnerability of the

world's water towers. *Nature* |, 577(7790), 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>

- Jomelli, V., Favier, V., Rabatel, A., Brunstein, D., Hoffmann, G., & Francou, B. (2009). Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and palaeoclimatic implications: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* |, 281(3–4), 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.10.033>
- Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers* |. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546075>
- Manoj, A., Shukla, A., & Gupta, R. (2011). Digital image information extraction techniques for snow cover mapping from remote sensing data. En *Proceedings of the International Conference on Advances in Remote Sensing and GIS* | (pp. 213–232). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_498
- Paul, F., Barrand, N., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S. P., Konovalov, V., Le Bris, R., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., & Winsvold, S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology* |, 54(63), 171–182. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gómez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere* |, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rabatel, A., Ceballos, J. L., Micheletti, N., Jordan, E., Braitmeier, M., González, J., Mölg, N., Ménégoz, M., Huggel, C., & Zemp, M. (2018). Toward an imminent extinction of Colombian glaciers? *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* |, 100(1), 75–95. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1383015>
- Servizio Glaciologico Lombardo. (2022). *Monitoraggio 2018–2022 ghiacciaio Chachacomani, Cordigliera Real (Bolivia)* |. Informe interno sin publicar.
- Skiles, S. M., Flanner, M., Cook, J. M., Dumont, M., & Painter, T. H. (2018). Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. *Nature Climate Change* |, 8(11), 964–971. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0296-5>
- Vuille, M., & Bradley, R. S. (2000). Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters* |, 27(23), 3885–3888. <https://doi.org/10.1029/2000GL011871>

- Vuille, M., Bradley, R. S., Werner, M., & Keimig, F. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change*, 59(1–2), 75–99. <https://doi.org/10.1023/A:1024406427519>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmänn, N., & Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382–386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>

Introducción

La criósfera constituye uno de los componentes más sensibles del sistema climático terrestre y desempeña un papel fundamental en la regulación hídrica, climática y ecológica de las regiones de alta montaña. En particular, los glaciares tropicales de los Andes han experimentado un retroceso acelerado durante las últimas décadas como consecuencia de diversos factores asociados al cambio climático global, lo que ha generado una creciente preocupación científica y social por las implicaciones ambientales, hidrológicas y socioeconómicas de su transformación. En este contexto, el presente volumen reúne una serie de contribuciones presentadas en el simposio, las cuales abordan diferentes enfoques de investigación relacionados con la dinámica y el estudio de la criósfera. Las ponencias recopiladas se articulan en torno a diversos ejes temáticos que reflejan las principales líneas de investigación actuales, entre los que se destacan los estudios orientados al monitoreo y observación de la criósfera mediante mediciones de campo, análisis geoespacial y técnicas de teledetección para evaluar los cambios en los sistemas glaciares. Asimismo, se incluyen investigaciones que analizan la relación entre agua, riesgo y comunidades, resaltando la importancia de los glaciares como fuentes estratégicas de recursos hídricos y su papel en la seguridad hídrica de las poblaciones que dependen de los ecosistemas de montaña. De igual manera, varios trabajos examinan los impactos del cambio climático sobre los glaciares tropicales, abordando procesos de retroceso glaciar, variabilidad climática y cambios en el balance energético de la nieve y el hielo. También se presentan estudios relacionados con la presencia de partículas absorbentes de luz, como el black carbon, contaminante atmosférico que al depositarse sobre la nieve reduce el albedo superficial y acelera los procesos de fusión glaciar. Finalmente, el volumen incorpora contribuciones que destacan la innovación tecnológica aplicada al estudio de la criósfera, incluyendo el uso de sensores remotos, modelación ambiental y nuevas metodologías de análisis para mejorar el monitoreo y la comprensión de estos sistemas en un contexto de cambio climático.

Monitoreo y observación de la atmósfera

Monitoreo y Balance de Masa Glaciar en Colombia ¿cómo interpretar a nuestros glaciares?

Jorge Ceballos Liévano ¹

Introducción

Los glaciares tropicales colombianos son sistemas altamente sensibles al cambio climático, constituyendo indicadores fundamentales de las variaciones climáticas a escala regional y global (Rabatel et al., 2013). Colombia cuenta con glaciares en la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán y en el Volcán Nevado Santa Isabel, ecosistemas crionivales monitoreados sistemáticamente por el IDEAM desde hace décadas (Ceballos et al., 2006). Estudios recientes señalan que, de mantenerse las tendencias actuales de calentamiento, estos glaciares podrían desaparecer en el transcurso del presente siglo (Ceballos et al., 2017).

El seguimiento de estos cuerpos de hielo requiere la integración de múltiples variables glaciológicas, entre ellas la Línea de Equilibrio Altitudinal (ELA), el balance de masa, el espesor de nieve y hielo, y las condiciones climáticas locales (Francou & Pouyaud, 2004). La información recopilada permite cuantificar las tasas de retroceso glaciar y compararlas con tendencias observadas a nivel mundial, donde la pérdida de masa glaciar se ha acelerado significativamente desde la segunda mitad del siglo XX (Zemp et al., 2019; IPCC, 2019).

El objetivo de esta presentación es exponer la metodología empleada por el IDEAM para el monitoreo glaciológico en Colombia, los resultados del balance de masa de los glaciares de referencia nacional, y el contexto de estos hallazgos dentro de las tendencias globales documentadas por el *World Glacier Monitoring Service* (WGMS, 2023; IDEAM, 2023).

Palabras clave: Glaciares tropicales; Balance de masa; ELA; Monitoreo glaciológico; IDEAM; Colombia.

Materiales y Métodos

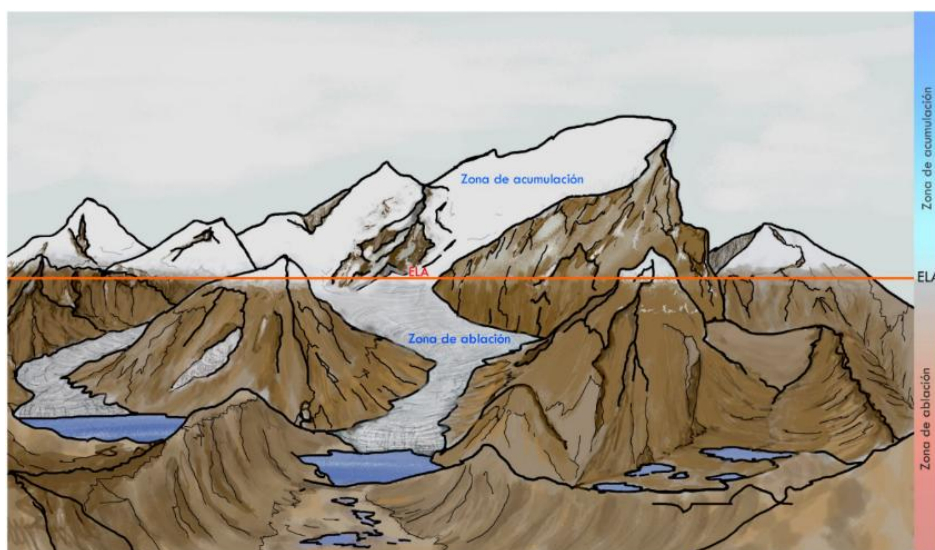
Línea de Equilibrio Altitudinal (ELA)

La Línea de Equilibrio Altitudinal (ELA) separa la zona de acumulación de la zona de ablación glaciar. Su posición altitudinal es un indicador directo de las condiciones climáticas y del estado de salud del glaciar, siendo ampliamente utilizada como parámetro de referencia en el monitoreo glaciológico a escala mundial (Francou & Vincent, 2007). En los glaciares colombianos, la ELA se situaba a finales del siglo XIX alrededor de los 4500 m

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia; jceballos@ideam.gov.co

s.n.m., mientras que a finales del siglo XX se encontraba hacia los 5200 m s.n.m., y en la actualidad se registra aproximadamente a 4950 ± 20 m s.n.m., reflejando un ascenso altitudinal sostenido asociado al incremento de las temperaturas en la franja glaciaria (IDEAM, 2023). Este comportamiento es coherente con lo documentado para otros glaciares tropicales andinos, donde el desplazamiento vertical de la ELA constituye una de las señales más claras del impacto del cambio climático sobre la criosfera de alta montaña (Rabatel et al., 2020; Schoolmeester et al., 2018).

Figura 1. Esquema de la Línea de Equilibrio Altitudinal (ELA) y su variación histórica. Fuente: IDEAM.

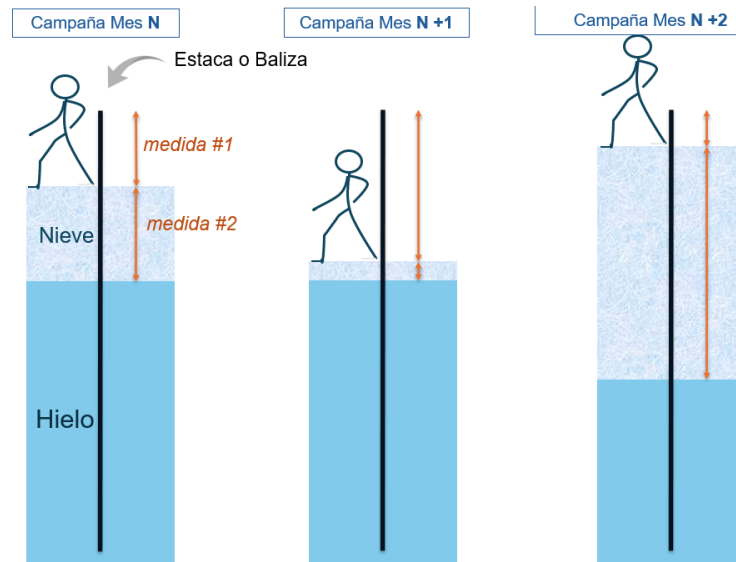


Balance de Masa Glaciar

El balance de masa glaciar representa el equivalente en agua de lo que gana y lo que pierde un glaciar durante un período determinado. Se expresa en metros equivalentes de agua (m e.a.) y se calcula a partir de mediciones de campo en estacas o balizas distribuidas sobre el glaciar (Francou & Pouyaud, 2004). Este parámetro es considerado uno de los indicadores más directos y precisos para evaluar la respuesta de un glaciar ante las variaciones climáticas, siendo utilizado de forma estandarizada por la red global de monitoreo glaciológico (WGMS, 2023).

La metodología de campo consiste en instalar una red de balizas sobre el glaciar que permiten medir la variación del espesor de nieve e hielo entre campañas de monitoreo. Cada baliza se mide en campañas sucesivas (Campaña Mes N, N+1, N+2), registrando la emergencia de la estaca por encima de la superficie. La diferencia entre campañas, combinada con la densidad de la nieve, permite calcular el balance (IDEAM, 2021). En Colombia, esta metodología ha sido aplicada de manera continua en los glaciares de referencia nacional, permitiendo construir series temporales de largo plazo que documentan la evolución del balance de masa glaciar a escala decenal (IDEAM, 2023).

Figura 2. Esquema de medición con balizas o estacas para el cálculo del balance de masa. Fuente: IDEAM.



Medición del Espesor de Nieve

Para determinar el espesor de nieve se emplean sondas manuales y balanzas de campo que permiten medir tanto la profundidad de la nieve como su densidad. La fórmula utilizada para el cálculo del balance (Bm) es:

$$Bm = \rho_h \times (\text{Variación espesor HIELO}) + \rho_n \times (\text{Variación espesor NIEVE})$$

Donde $\rho_h = 0,9 \text{ g/cm}^3$ y $\rho_n = 0,4 \text{ g/cm}^3$ son las densidades del hielo y la nieve respectivamente. El resultado se convierte a metros equivalentes de agua (m e.a.), donde $1 \text{ m e.a.} = 1000 \text{ kg/m}^2 = 1 \text{ Tonelada/m}^2$.

Red de Monitoreo y Trabajo de Campo

El IDEAM realiza campañas periódicas de monitoreo en los glaciares de referencia colombianos, siguiendo protocolos estandarizados compatibles con las directrices del sistema de observación glaciológica mundial (WGMS, 2023). Las actividades incluyen: medición de balizas, toma de datos de espesor de nieve y surgencia, registro de datos climatológicos, y levantamientos topográficos (IDEAM, 2023). Este conjunto de variables permite obtener una caracterización integral del estado glaciar, abarcando tanto los procesos de acumulación como los de ablación que determinan el balance de masa anual (Francou & Pouyaud, 2004).

Adicionalmente, se emplean cámaras de foto-seguimiento (time-lapse) para el registro continuo de cambios superficiales, herramienta que ha cobrado especial relevancia para documentar la aceleración del retroceso glaciar observada en años recientes (IDEAM, 2021).

Figura 3. Red de balizas en el glaciar (puntos amarillos). Fuente: IDEAM

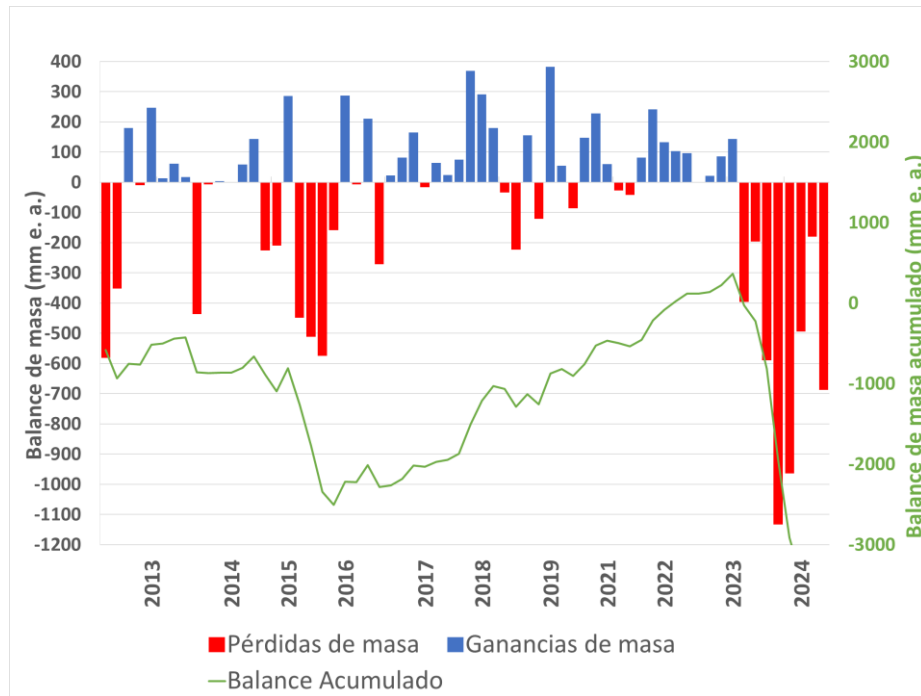


Resultados

Balance de Masa: Sierra Nevada El Cocuy o Güicán

Los resultados del balance de masa del glaciar Ritacuba Blanco muestran una tendencia negativa sostenida, con predominio de años con pérdida de masa sobre los de ganancia (IDEAM, 2023; Ceballos et al., 2006). El balance acumulado evidencia una pérdida progresiva durante el período de monitoreo, con algunas recuperaciones puntuales asociadas a eventos climáticos como La Niña, las cuales no logran revertir la tendencia de largo plazo (IDEAM, 2021; Ceballos et al., 2017).

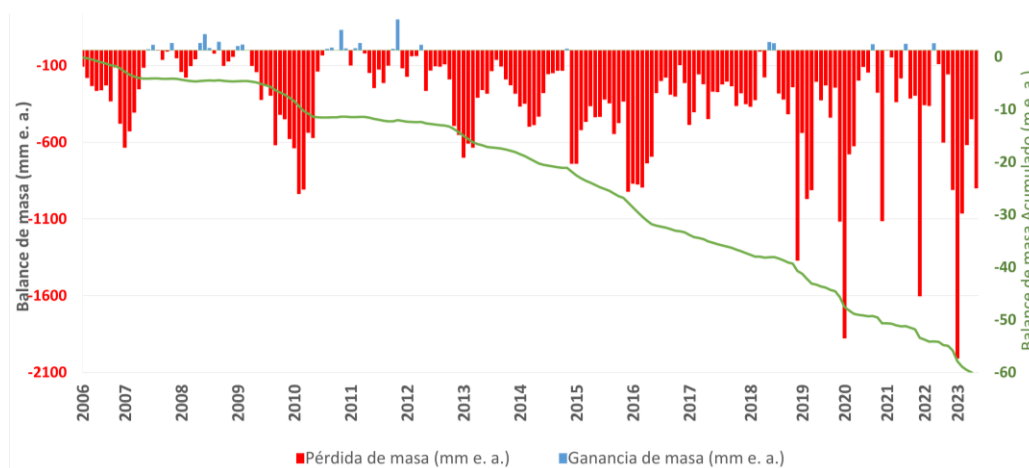
Figura 4. Balance de masa glaciar Ritacuba Blanco, Sierra Nevada El Cocuy o Güicán. Fuente: IDEAM.



Balance de Masa: Nevado Santa Isabel

El glaciar Conejeras en el Nevado Santa Isabel registra igualmente un balance de masa negativo acumulado, con pérdidas de masa que superan los 2000 mm e.a. en el período analizado. La comparación entre ambos glaciares colombianos de referencia evidencia patrones similares de retroceso, aunque con intensidades variables según las condiciones locales de cada macizo.

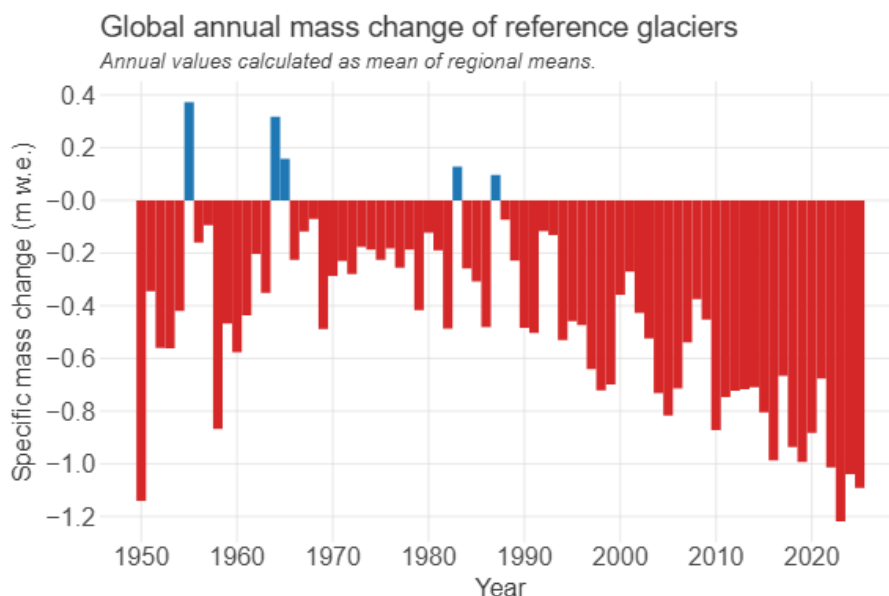
Figura 5. Balance de masa glaciár Conejeras, Nevado Santa Isabel. Fuente: IDEAM



Contexto Global: Glaciares de Referencia Mundial

Los glaciares colombianos se enmarcan dentro de la tendencia global de pérdida de masa glaciár. Según el World Glacier Monitoring Service (WGMS), el cambio anual de masa de los glaciares de referencia mundial muestra una aceleración del retroceso desde la década de 1990, con valores negativos que superan los $-0,8$ m e.a. por año en promedio global.

Figura 6. Cambio anual de masa de glaciares de referencia mundiales (WGMS).
Fuente: IDEAM / WGMS



Colombia participa en la red de glaciares de referencia del WGMS con sus dos macizos glaciares activos (WGMS, 2023). La comparación con la red global confirma que el retroceso de los glaciares colombianos es consistente con las tendencias mundiales (Zemp et

al., 2019), aunque los glaciares tropicales presentan particularidades relacionadas con su alta sensibilidad a las variaciones de temperatura y precipitación (Rabatel et al., 2020; Schoolmeester et al., 2018).

Cambios Recientes: Glaciar Santa Isabel (2017–2024)

La comparación fotográfica del sector El Hongo del Glaciar Santa Isabel entre 2017 y 2024 evidencia una marcada reducción en la extensión superficial del glaciar. La pérdida de cobertura glaciar en este período refleja la aceleración del proceso de deglaciación, poniendo en riesgo la permanencia de este cuerpo de hielo a mediano plazo.

Figura 7. Comparación fotográfica del Glaciar Santa Isabel, sector El Hongo (2017 vs. 2024). Fuente: IDEAM.



Conclusiones

El monitoreo sistemático de los glaciares colombianos realizado por el IDEAM El monitoreo sistemático realizado por el IDEAM (2023) confirma una tendencia sostenida de pérdida de masa glaciar en los dos macizos de referencia nacional: la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán y el Volcán Nevado Santa Isabel. Estos resultados son coherentes con las tendencias globales documentadas por el World Glacier Monitoring Service (WGMS, 2023; Zemp et al., 2019). En este contexto, la ELA ha ascendido desde aproximadamente 4500 m s.n.m. durante el siglo XIX hasta cerca de 4950 ± 20 m s.n.m. en la actualidad, evidenciando un calentamiento sostenido en la franja glaciar tropical (Francou & Vincent, 2007; Rabatel et al., 2020). De forma consistente, el balance de masa acumulado de los glaciares Ritacuba Blanco y Conejeras muestra valores marcadamente negativos, con pérdidas que superan los 2000 mm e.a. durante el período de registro (IDEAM, 2021; Ceballos et al., 2006).

El seguimiento de estos cambios se realiza mediante una metodología basada en balizas y medición de espesor de nieve, complementada con levantamientos topográficos y cámaras de monitoreo continuo (Francou & Pouyaud, 2004; IDEAM, 2023). La variabilidad climática asociada al ENSO genera fluctuaciones interanuales importantes en el balance de masa; sin embargo, estas no logran revertir la tendencia negativa de largo plazo (Ceballos et al., 2017; Schoolmeester et al., 2018).

En este marco, Colombia destaca como el único país del mundo con glaciares activos en zona ecuatorial con monitoreo continuo de largo plazo, aportando información clave al sistema global de observación del WGMS (Rabatel et al., 2013; IDEAM, 2023).

Referencias

Ceballos, J. L., et al. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, 43, 194–201.

Ceballos, J. L., et al. (2017). Toward an imminent extinction of Colombian glaciers. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*.

Francou, B., & Pouyaud, B. (2004). Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales. IRD.

Francou, B., & Vincent, C. (2007). *Les glaciers à l'épreuve du climat*. IRD Éditions.

IDEAM. (2021). Informe del Estado de los Glaciares Colombianos 2020. Bogotá, Colombia.

IDEAM. (2023). Monitoreo de glaciares colombianos. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IPCC. (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. <https://www.ipcc.ch/srocc/>

Rabatel, A., et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective. *The Cryosphere*, 7, 81–102.

Rabatel, A., et al. (2020). A review of the current state and recent changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8.

Schoolmeester, T., et al. (2018). *The Andean Glacier and Water Atlas*. UNESCO/GRID-Arendal.

WGMS. (2023). Global Glacier Change Bulletin No. 5. Zurich, Switzerland: WGMS. <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09>

Zemp, M., et al. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise. *Nature*, 568, 382–386.

Uso de imágenes satelitales PlanetScope para la estimación del área glaciar en Colombia

Andrés Cruz Mendoza²

Introducción

Los glaciares colombianos constituyen indicadores privilegiados del cambio climático global debido a su ubicación estratégica en la franja ecuatorial, donde la débil estacionalidad térmica y la fuerte influencia de la radiación solar los hacen altamente sensibles a pequeñas variaciones atmosféricas. Su localización cercana al límite altitudinal de la criósfera tropical permite que reflejen con rapidez los cambios en la temperatura del aire y en los patrones de precipitación asociados a la dinámica de la alta troposfera. Sin embargo, desde mediados del siglo XIX han experimentado un retroceso acelerado y prácticamente continuo.

De acuerdo con estimaciones recientes, la superficie glaciar nacional se ha reducido en más del 92 % entre aproximadamente 1850 y 2024, pasando de cerca de 349 km² a menos de 30.8 km². Este proceso refleja la alta vulnerabilidad de los glaciares tropicales frente a las variaciones climáticas y resalta la necesidad de contar con herramientas de monitoreo precisas que permitan evaluar su evolución espacial y temporal.

El monitoreo sistemático de la reducción glaciar ha sido posible gracias al uso de imágenes satelitales, las cuales constituyen una herramienta fundamental para la delimitación y el análisis multitemporal de la cobertura de hielo. No obstante, la resolución espacial de varios satélites de acceso libre puede resultar insuficiente frente al reducido tamaño y la alta fragmentación actual de los glaciares colombianos. En este contexto, el uso de imágenes multispectrales de media y alta resolución espacial, como las proporcionadas por PlanetScope, permite mejorar significativamente la precisión en la detección de cambios y en la cuantificación de la dinámica glaciar.

Palabras clave: Teledetección; glaciares; PlanetScope; criósfera tropical; monitoreo glaciar.

Materiales y métodos

Para el desarrollo del estudio se utilizaron imágenes satelitales PlanetScope adquiridas mediante la plataforma Planet Explorer durante la temporada de baja precipitación (enero–marzo de 2024), con el fin de minimizar la presencia de nubosidad y nieve reciente. Se emplearon escenas en su máximo nivel de procesamiento disponible, ortorectificadas y

² Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia; afcruz@ideam.gov.co

con corrección radiométrica aplicada (3B), lo que garantiza consistencia geométrica y espectral para el análisis.

El procesamiento digital de las imágenes se realizó mediante el software QGIS versión 3.30.2. En este proceso se aplicaron composiciones espectrales, cálculo de razón de bandas (band ratio), reclasificación de valores espectrales y delimitación vectorial del área glaciar.

La técnica de band ratio consistió en la división píxel a píxel entre una banda de alta reflectancia en el espectro visible y una banda de menor reflectancia en el infrarrojo cercano, con el objetivo de maximizar el contraste entre nieve o hielo y otras coberturas como roca o suelo. En este estudio se aplicó la relación entre las bandas 1 y 8 de PlanetScope, aprovechando la alta reflectancia de la nieve en el visible y su menor respuesta en el infrarrojo cercano.

Posteriormente, los resultados fueron reclasificados mediante un umbral dinámico entre 0.5 y 0.8, ajustado según las condiciones de iluminación, pendiente y presencia de sombra. Finalmente, la clasificación automatizada fue complementada mediante delineación manual, técnica que permite corregir errores de clasificación mediante la interpretación visual de características como textura, color, forma y patrón espacial del hielo.

Asimismo, se estimó la incertidumbre asociada a la delimitación del área glaciar considerando la resolución espacial de la imagen y el perímetro de los polígonos glaciares delimitados.

Resultados

Los resultados obtenidos para el año 2024 estiman una superficie glaciar total en Colombia de **30.83 km² ± 0.48**. El análisis evidenció que el valor de umbral más adecuado para la reclasificación del band ratio fue 0.8, ya que permitió una correcta discriminación del hielo limpio bajo condiciones favorables de iluminación. Sin embargo, en zonas con sombra topográfica, pendientes pronunciadas o presencia de nubosidad residual fue necesario ajustar el umbral a valores cercanos a 0.5 para mejorar la identificación de hielo y nieve.

La distribución del área glaciar estimada para las principales zonas glaciares del país fue la siguiente:

- Sierra Nevada del Cocuy o Güicán: 11.88 km²
- Volcán Nevado del Ruiz: 7.17 km²
- Volcán Nevado del Huila: 6.33 km²
- Sierra Nevada de Santa Marta: 4.84 km²
- Nevado del Tolima: 0.45 km²
- Nevado Santa Isabel: 0.16 km²

En el caso particular del glaciar del Nevado del Ruiz, se identificó que la presencia recurrente de depósitos de ceniza volcánica afecta significativamente la reflectancia superficial, reduciendo el contraste espectral entre hielo y roca y limitando la eficacia de la clasificación automática basada en imágenes PlanetScope.

Conclusiones

Las imágenes satelitales PlanetScope constituyen un insumo de alta resolución espacial adecuado para la estimación y el monitoreo del área glaciar en Colombia. No obstante, los resultados obtenidos mediante clasificación automatizada requieren validación y ajustes mediante delineación manual con el fin de optimizar la precisión cartográfica.

El reducido tamaño y la alta fragmentación actual de los glaciares colombianos hacen que, en ciertos casos, incluso la resolución espacial de PlanetScope sea insuficiente para una delimitación completamente automática, especialmente en zonas con sombra, detritos o hielo cubierto.

La combinación de técnicas de procesamiento digital, como el band ratio, con interpretación experta mejora significativamente la discriminación entre hielo, nieve residual y roca expuesta, reduciendo los errores de clasificación y fortaleciendo las estrategias de monitoreo de la criósfera tropical.

Referencias

Ceballos Liévano, J. L., Cruz Mendoza, A. F., Martínez Serrano, S. y Zuluaga Cárdenas, L. C. (2025). Informe del estado de los glaciares colombianos 2024. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Flórez A. (1992). Los nevados de Colombia, glaciares y glaciaciones. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC.

Flórez, A. (2003). Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Universidad Nacional de Colombia. Unibiblos. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53415>

Hall, D. K., Ormsby, J. P., Bindschadler, R. A., & Siddalingaiah, H. (1987). Characterization of Snow and Ice Reflectance Zones On Glaciers Using Landsat Thematic Mapper Data. *Annals of Glaciology*, 9, 104–108. doi:10.3189/S0260305500000471

Jomelli, V., Favier, V., Rabatel, A., Brunstein, D., Hoffmann, G., Francou, B., 2009. Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and palaeoclimatic implications: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 269–282. DOI: 10.1016/j.palaeo.2008.10.033

G. Kaser and H. Osmaston 2002. Tropical glaciers. Cambridge, etc., Cambridge University Press, xx + 207 pp. + map. (International Hydrology Series.) ISBN 0-521-63333-8, hardback

Manoj, A., Shukla, A., & Gupta, R. (2011). Digital image information extraction techniques for snow cover mapping from remote sensing data. En *Proceedings of the International Conference on Advances in Remote Sensing and GIS* (pp. 213–232). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_498

Paul, F., Barrand, N., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., & Casey, K. et al. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals Of Glaciology*, 54(63), 171-182. doi: 10.3189/2013aog63a296

Rabatel, A., Castebrunet, H., Favier, V., Nicholson, L., and Kinnard, C.: Glacier changes in the Pascua-Lama region, Chilean Andes (29° S): recent mass balance and 50 yr surface area variations, *The Cryosphere*, 5, 1029–1041, <https://doi.org/10.5194/tc-5-1029-2011>, 2011.

Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gómez, J., Cáceres, B., Ceballos, J.L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Ménégos, M., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M., y Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), pp. 81-102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>.

Rabatel, A., Ceballos, J. L., Micheletti, N., Jordan, E., Braitmeier, M., González, J., ... Zemp, M. (2018). Toward an imminent extinction of Colombian glaciers? *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 100(1), 75–95. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1383015>

Rott, H., & Markl, G. (1989). Improved snow and glacier monitoring by the Landsat Thematic Mapper. European Space Agency.

Vuille, M., Bradley, R.S., 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters* 27, 3885–3888

Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M., Keimig, F., 2003. 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climatic Change* 59 (1–2), 75–99.

Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B.G., Bradley, R.S., 2008. Climate change and tropical Andean glaciers—Past, present and future. *Earth-Science Reviews* 89, 79–96. DOI: 10.1016/j.earscirev.2008.04.002

Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>.

Monitoreo glaciológico del Nevado Chachacomani (Bolivia): resultados preliminares 2018–2022

Davide Vitale³, Miriam Campoleoni⁴

Introducción

El proyecto científico y educativo de monitoreo glaciológico del Nevado Chachacomani ha nacido en el 2017 fruto de la colaboración entre el Servizio Glaciologico Lombardo (SGL - Italia) y el Paralelo Peñas de la Unidades Académica Campesina Tiahuanacu (UACT-UCB) . El objetivo del mismo es investigar para comprender mejor causas, magnitud y efectos de las variaciones sufridas por el glaciar de este nevado, uno de los más grandes glaciares tropicales existentes y una importante fuente de agua ya sea para consumo humano o uso agrícola para todo el Altiplano paceño.

El Nevado Chachacomani (6074 msnm) se ubica en la cordillera Real de los Andes, entre las provincias Los Andes y Larecaja, a las nacientes del río Keka Jawira, quién provee de agua a toda la cuenca agrícola y ganadera de Achacachi además de ser uno de los principales inmisarios del Lago Titicaca. A título de recordatorio, se sabe que casi la tercera parte del agua de La Paz y El Alto procede de los deshielos de la Cordillera Real. (Soruco, 2012)

El alcance didáctico y formativo es uno de los pilares del proyecto de monitoreo glaciológico. A lo largo de los años más de 50 estudiantes de la UAC y otras universidades bolivianas han sido parte de las campañas de medición en alta montaña, adquiriendo conciencia y conocimientos teóricos y prácticos sobre la realidad del cambio climático que afecta directamente al mismo territorio de sus comunidades de origen.

Palabras clave: glaciares tropicales; monitoreo glaciar; balance de masa; Cordillera Real.

Materiales y métodos

Balizas ablatométricas: se trata de estacas de madera graduadas que se plantan en la superficie del sector inferior del glaciar (“área de ablación”) y que nos permiten gracias a los controles periódicos conocer las variaciones de espesor sufridas por el glaciar en los puntos determinados.

Mediciones frontales: se mide con una cinta métrica la distancia que separa el límite inferior del glaciar de un punto determinado, generalmente una roca grande inamovible marcada con pintura y coordenadas GPS. Eso nos indica el retroceso del glaciar en metros lineales.

³ Paralelo Peñas Unidad Académica Campesina Tiahuanacu, Bolivia; davide.vitale@hotmail.com

⁴ Servizio Glaciologico Lombardo, Italia; miriam.campoleoni@hotmail.it

Comparaciones fotográficas: sacando fotografías anualmente desde el mismo lugar utilizando el mismo azimuth y focal podemos detectar variaciones sufridas por la superficie del glaciar como ser, por ejemplo: mayor o menor cobertura de nieve nueva, abertura de “ventanas” rocosas que indican una pérdida de espesor, cambios en los sectores agrietados, lagunas pro, peri y epiglaciares.

Estudios nivológicos: se realizan en el sector superior del glaciar (“área de acumulación”) donde hay comparativamente menor fusión y sublimación y mayor acumulación y compactación de nieve. En lo concreto, se realizan calicatas para medir el espesor, la densidad de la capa de nieve, así como sus características cristalográficas.

Resultados

Se presenta a continuación un breve resumen de los datos más sobresalientes obtenidos en el intervalo 2018 a 2022

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos. Fuente (elaboración propia en base a notas de campaña 2018-2022)

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos.

Metodología	Resultados
Balizas ablatométricas	Perdida de espesor de hasta 17 metros en el sector inferior
Mediciones frontales	Retroceso de 60.7 metros lineales
Comparaciones fotográficas	Aumento de tamaño de la laguna de reciente formación, pasando su superficie de 22,293 a 52574 m ²
Estudios nivológicos	Fuertes acumulaciones en año caracterizados por la Niña, insuficientes a compensar la pérdida de masa en el sector inferior

Para que un glaciar tropical esté en condiciones de equilibrio, al menos 70% de su superficie debe permanecer cubierto de nieve nueva a lo largo del año hidrológico (Soruco, 2012), lo cual al elevar su índice albedo y reflejar los rayos del sol en vez de absorberlo. En años recientes y mayormente por factores de origen humana (incendios forestales, contaminación del aire) el mencionado índice albedo ha ido bajando drásticamente. Por otra parte, las variaciones del índice ENSO afectan fuertemente el balance de masa de los glaciares tropicales (Ramirez, 2003).

Cruzando los datos arrojados por las balizas ablatométricas con los datos obtenidos mediante los sondeos nivológicos se obtiene el balance de masa global, expresado en metros cúbicos equivalente agua, que es el dato más importante a nivel de estimación de las reservas hídricas. Entre 2018 y 2022 el glaciar Chachacomani ha perdido más de 36 millones de metros cúbicos en equivalente agua (Servizio Glaciologico Lombardo, 2022), lo que equivale a la mitad de la capacidad instalada total de las represas de la conurbación La Paz – El Alto.

Conclusiones

Los estudios realizados muestran de forma concordante el deshielo en curso sobre uno de los mayores glaciares de la Cordillera Real. A medida que avancen las investigaciones, los investigadores entienden mejor la correlación entre fluctuaciones de las masas glaciares y fenómenos exógenos como incendios forestales y cambios en el índice ENSO.

Referencias

- Paralelo Peñas Unidad Académica Campesina Tiahuanacu (2022), *Notas de campaña 2018-2022*, sin publicar
- Ramirez, E. (2003), *Interpretation de la variabilité climatique enregistrée dans les carottes de glace à partir des isotopes stables de l'eau, cas des Andes tropicales*, Université Pierre et Marie Curie
- Servizio Glaciologico Lombardo (2022), *Monitoraggio 2018–2022 ghiacciaio Chachacomani Cordigliera Real (Bolivia)*, sin publicar
- Soruco, A. (2012), *Medio siglo de fluctuaciones glaciales en la Cordillera Real*, Institut de Recherche pour le Développement

Modelación de la incidencia de partículas absorbentes de luz en la Sierra Nevada del Cocuy

Gladis Loaiza Rada⁵

Introducción

Los glaciares tropicales constituyen ecosistemas altamente sensibles al cambio climático y desempeñan un papel fundamental en la regulación hídrica regional (Rabatel et al., 2013). En Colombia, el retroceso glaciar ha sido acelerado durante las últimas décadas, con reducciones significativas en área y volumen reportadas por el IDEAM (IDEAM, 2018). En la Sierra Nevada del Cocuy, uno de los complejos glaciares más representativos del país, además del incremento térmico global, la deposición de aerosoles absorbentes de luz como el black carbon (BC) y el polvo mineral contribuye a la disminución del albedo superficial.

El BC es considerado uno de los contaminantes climáticos de vida corta con mayor capacidad de forzamiento radiativo después del CO₂ (Bond et al., 2013). Su deposición sobre superficies nevadas reduce la reflectancia y aumenta la absorción de radiación solar, generando retroalimentaciones positivas que aceleran el derretimiento (Flanner et al., 2007). El IPCC (2021) reconoce que estos procesos amplifican la pérdida de masa glaciar, particularmente en regiones de alta montaña.

Sin embargo, en glaciares tropicales aún existen vacíos en la cuantificación del impacto radiativo de aerosoles mediante análisis de largo plazo integrando modelación física y teledetección. En este contexto, la presente ponencia, enmarcada en el eje Black Carbon, tuvo como objetivos: (1) caracterizar la variabilidad temporal del BC y polvo mineral entre 2003–2023; (2) evaluar su efecto en la reducción del albedo glaciar; y (3) comparar el desempeño de los modelos OptiPar, SNICAR y SnowTARTES bajo condiciones tropicales.

Palabras clave: glaciares tropicales; black carbon; albedo; modelación radiativa.

Materiales y métodos

El área de estudio corresponde al complejo glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy. Se emplearon series temporales satelitales de 20 años (2003–2023) asociadas a concentraciones de BC, polvo mineral y parámetros radiativos.

La metodología se estructuró en tres fases:

1. Procesamiento de datos:

Organización y depuración de series temporales, análisis estadístico descriptivo y evaluación de tendencias interanuales.

2. Modelación del albedo:

⁵ Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales (GIMSA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia; gladisloaizadr@unimagdalena.edu.co

Se aplicaron tres modelos de transferencia radiativa ampliamente utilizados en estudios de nieve: Se aplicaron tres modelos de transferencia radiativa: SNICAR (Flanner et al., 2007), SnowTARTES (Libois et al., 2013) y OptiPar.

Se realizaron múltiples simulaciones variando concentraciones de BC, polvo y ángulo cenital solar.

3. Análisis comparativo:

Se evaluó la sensibilidad del albedo ante cambios en la concentración de aerosoles y se compararon las respuestas estructurales entre modelos.

El análisis permitió identificar patrones de reducción del albedo y diferencias metodológicas en la representación de procesos ópticos.

Resultados

Los resultados evidencian que el incremento en la concentración de black carbon y polvo genera una disminución significativa del albedo, especialmente en el rango visible del espectro solar. La reducción del albedo aumenta progresivamente con la concentración del contaminante, confirmando su alto potencial de forzamiento radiativo.

El análisis comparativo mostró diferencias en la magnitud de la reducción estimada entre los modelos OptiPar, SNICAR y SnowTARTES, asociadas a sus esquemas de parametrización y representación de procesos ópticos. Sin embargo, los tres modelos coinciden en la tendencia general: mayores concentraciones de BC implican mayor absorción de energía y potencial aceleración del derretimiento.

El análisis temporal sugiere variabilidad interanual en la deposición de contaminantes, lo que podría estar relacionado con fuentes regionales de emisión y condiciones atmosféricas.

Estos hallazgos refuerzan la relevancia del BC y polvo como agente acelerador del retroceso glaciar en ambientes tropicales y evidencian la importancia de integrar modelación física y teledetección en estudios de la criosfera colombiana.

Conclusiones

El black carbon y el polvo mineral influyen significativamente en la reducción del albedo glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, aumentando la absorción de radiación solar y favoreciendo procesos de fusión acelerada.

La comparación entre modelos permitió identificar diferencias en sensibilidad, pero coincidencias en la tendencia general del impacto radiativo.

Este estudio fortalece la base científica sobre criosfera tropical en Colombia y aporta herramientas para el monitoreo y la formulación de estrategias de mitigación frente al cambio climático.

Tabla 1. Variables consideradas en el estudio

Variable	Descripción
Concentración de black carbon (BC)	Cantidad de partículas absorbentes de luz depositadas en la nieve, evaluadas en diferentes escenarios de simulación
Concentración de polvo mineral	Partículas minerales presentes en la nieve que influyen en la reflectancia superficial
Longitud de onda (nm)	Intervalo espectral de radiación solar utilizado para analizar el comportamiento del albedo
Albedo espectral	Fracción de radiación reflejada por la superficie nevada en función de la longitud de onda
Ángulo cenital solar	Ángulo entre la vertical y la dirección del Sol, utilizado como parámetro en la modelación radiativa
Modelo de transferencia radiativa	Herramientas utilizadas para la simulación del albedo: SNICAR, SnowTARTES y OptiPar.

Figura 1. Valores de albedo nieve variando la concentración de BC en el programa de OptiPar.

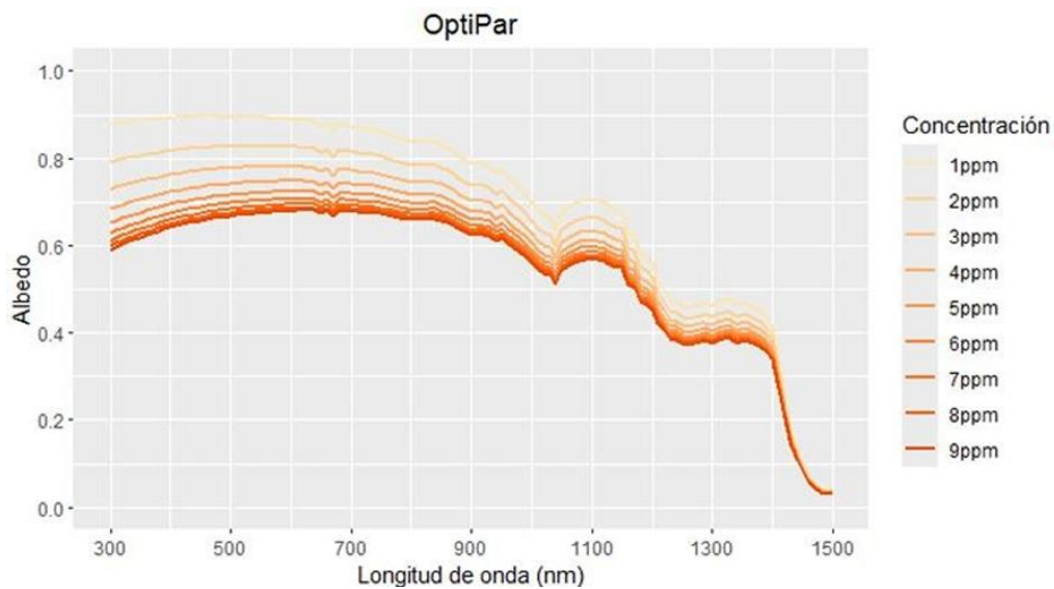


Figura 2. Valores de albedo nieve variando la concentración de polvo en el programa de OptiPar.

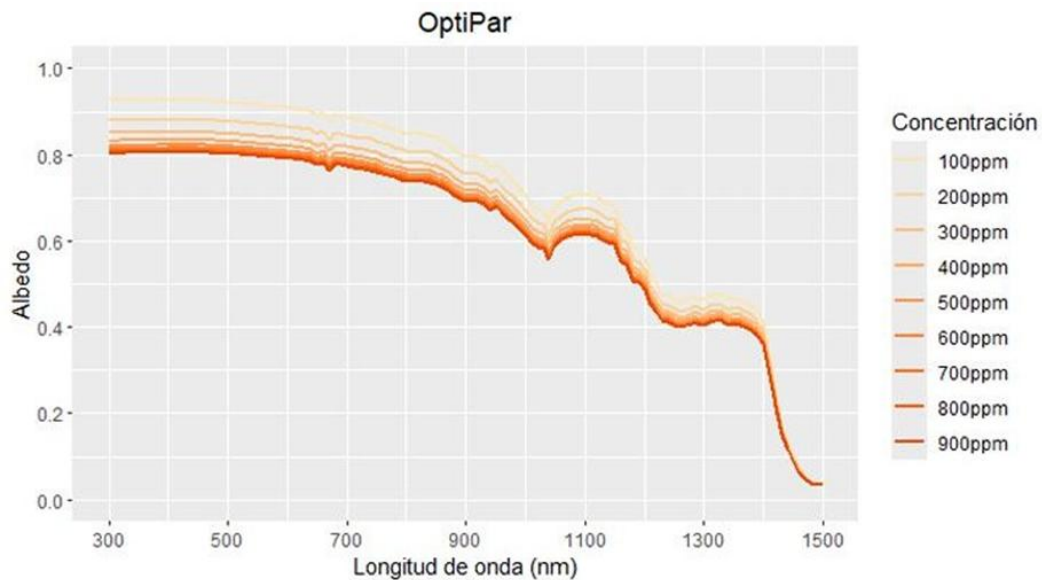
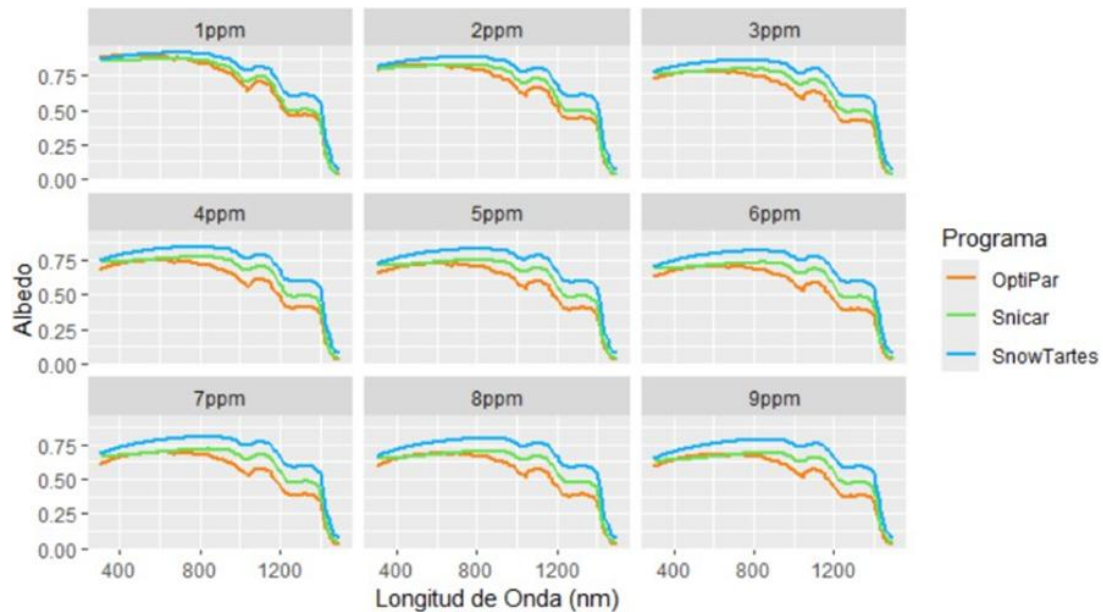


Figura 3. Valores de albedo de nieve con concentraciones de BC en los 3 programas.



Referencias

Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>

- Flanner, M. G., Zender, C. S., Randerson, J. T., & Rasch, P. J. (2007). Present-day climate forcing from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research*, 112, D11202. <https://doi.org/10.1029/2006JD008003>
- IDEAM. (2018). Estado de los glaciares colombianos 2010–2017. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Libois, Q., Picard, G., Arnaud, L., Morin, S., & Brun, E. (2013). Influence of grain shape on light penetration in snow. *The Cryosphere*, 7, 1803–1818. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1803-2013>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., & Sicart, J. E. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes. *The Cryosphere*, 7, 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>

Black Carbon

Efecto comparativo de la temperatura, carbono negro y polvo en la reducción del albedo en el glaciar Sierra Nevada El Cocuy (2000–2023)

Fredy Arid Tovar Bernal⁶, Tomás Bolaño Ortiz⁷, Magin Lapuerta⁸

Introducción

El albedo de la nieve determina la fracción de radiación solar reflejada por la superficie; en nieve fresca puede alcanzar valores superiores al 0,8–0,9, pero disminuye por envejecimiento térmico y por la deposición de partículas absorbentes de luz (LAP), como el carbono negro (BC) y el polvo mineral. En glaciares tropicales, donde la radiación incidente es alta y los márgenes de estabilidad energética son estrechos, pequeñas reducciones de albedo se traducen en incrementos sustanciales del derretimiento. La Sierra Nevada El Cocuy (Colombia) constituye un laboratorio natural para evaluar la contribución relativa de tres forzantes sobre la reducción del albedo entre 2000 y 2023: la temperatura de la superficie, el BC y el polvo mineral. Este trabajo aborda un vacío regional al integrar datos satelitales (albedo y temperatura MODIS), reanálisis (MERRA-2 para BC y polvo) y modelación espectral (SNICAR) para cuantificar el peso relativo de cada componente y su estacionalidad. Objetivos específicos: (i) compilar y depurar series temporales 2000–2023 de albedo de nieve, temperatura, BC y polvo sobre el Cocuy; (ii) estimar la reducción de albedo atribuible a cada forzante mediante un esquema de coeficientes (K_t , K_{bc} , K_d) apoyado en SNICAR; (iii) identificar temporadas y eventos de alto impacto (p. ej., intrusiones saharianas y periodos de quema) y discutir sus implicaciones para la criósfera tropical.

Palabras clave: albedo; carbono negro; polvo sahariano; glaciares tropicales

Materiales y métodos

Compilamos productos MODIS diarios para albedo de nieve y temperatura de la superficie (p. ej., MOD10/MYD10 y MOD11A1), y campos de reanálisis MERRA-2 de masa columnar de carbono negro y polvo mineral a resolución horaria/mensual. Tras enmascarar nubes y restringir el análisis a píxeles glaciares/nevados en el Cocuy, armonizamos temporalmente las series 2000–2023. Para traducir concentraciones de LAP a cambios espectrales del albedo construimos un marco de sensibilidad que permite derivar coeficientes relativos K_t (temperatura), K_{bc} (carbono negro) y K_d (polvo). Estos coeficientes se aplican

⁶ Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales (GIMSA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia; ftovar@unimagdalena.edu.co.

⁷ Universidad Católica del Maule, Chile; tbolano@ucm.cl.

⁸ Universidad Castilla La Mancha, España; magin.lapuerta@uclm.es

a anomalías normalizadas respecto a valores de referencia (ΔT , ΔBC , ΔD) para estimar la contribución fraccional de cada forzante a la reducción total del albedo. Complementariamente, analizamos patrones intra-anales y señales de eventos puntuales (intrusiones saharianas y temporadas de quema/incendios) para evaluar la estacionalidad y la interanualidad del impacto.

Resultados

La señal de Kt es robusta y persistente a lo largo del periodo 2000–2023, indicando que la temperatura domina la variabilidad de fondo en la reducción del albedo. Las contribuciones asociadas a Kd y Kbc muestran picos episódicos: el polvo registra máximos coincidentes con temporadas secas e intrusiones saharianas, mientras que el BC se intensifica durante periodos de quemas e incendios regionales. A escala mensual, los mínimos de albedo se alinean con ventanas secas, cuando el aporte de polvo es mayor y la nieve recién expuesta tiende a oscurecerse con rapidez. En conjunto, la combinación de forzamiento termodinámico (temperatura) y forzamientos ópticos (BC y polvo) explica tanto la tendencia de largo plazo como las caídas rápidas del albedo observadas en eventos discretos.

Conclusiones

En la Sierra Nevada El Cocuy, la temperatura es el principal controlador de la reducción del albedo en 2000–2023, mientras que el polvo mineral y el carbono negro introducen eventos de alto impacto que aceleran el oscurecimiento de la nieve. La identificación de temporadas críticas sugiere oportunidades de gestión y monitoreo: control de quemas, vigilancia de intrusiones de polvo y validación in situ del albedo y LAP. Como trabajo en curso, integramos SNICAR con series MODIS a resolución mensual y desarrollamos simulaciones para cuantificar deposición y transporte, con miras a escenarios de mitigación para glaciares tropicales.

Referencias

- Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). **The Physics of Glaciers** (4th ed.). Academic Press.
- Skiles, S. M., Flanner, M., Cook, J. M., Dumont, M., & Painter, T. H. (2018). Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. **Nature Climate Change**, 8, 964–971.
- Gelaro, R., et al. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, 30(14), 5419–5454.
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2016). MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m (MOD10A1). NASA NSIDC.
- Flanner, M. G., et al. (2007). Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. **Journal of Geophysical Research**, 112(D11).

- Hadley, O. L., & Kirchstetter, T. W. (2012). Black-carbon reduction of snow albedo. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 12, 4699–4705.
- He, C., et al. (2018). Microphysics of snow and its albedo: SNICAR model description and applications. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, 10(8), 1–21.

Incidencia del Black Carbon (BC) en los mantos nevados y su modelación en OptiPar

Eduardo Fontanilla Amaya⁹

Introducción

La deposición de partículas absorbentes de luz (LAPs), como Black Carbon (BC), carbono orgánico (OC) y polvo en la nieve disminuye el reflejo de la radiación solar al reducir el albedo, incrementando la energía absorbida por la superficie nevada y acelerando los procesos de fusión (Hansen and Nazarenko, 2004; Flanner et al., 2007; Hadley et al., 2010). Mientras la nieve fresca puede reflejar entre el 80–90 % de la energía incidente, la nieve envejecida o contaminada reduce su reflectancia a valores cercanos al 50–60 %. El BC, por su alta capacidad de absorción dentro del material particulado atmosférico, modifica el balance radiativo y contribuye al calentamiento regional (Díaz, 2016). En la cordillera de los Andes colombianos, persiste una limitada investigación sobre el impacto de estas partículas en la criósfera y su posible relación con el retroceso glaciar (Molina et al., 2015).

En este contexto, el objetivo general de este trabajo es evaluar el impacto del Black Carbon en las propiedades ópticas de la nieve andina mediante modelado geométrico de partículas empleando el programa OptiPar. Como objetivos específicos se plantean: (i) estimar la variación del albedo asociada a las concentraciones y morfologías de BC; (ii) analizar su contribución al forzamiento radiativo superficial; y (iii) aportar evidencia cuantitativa que fortalezca el estudio de la criósfera tropical colombiana.

Esta propuesta se articula con los objetivos del Primer Simposio de Ciencias de la Criósfera organizado por la dirección del Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales (GIMSA), al abordar la interacción atmósfera–criósfera y contribuir al entendimiento de los procesos físicos que inciden en la dinámica y vulnerabilidad de los glaciares tropicales frente al cambio climático.

Palabras clave: Albedo; Black Carbon (BC); Nieve; OptiPar.

Materiales y métodos

OptiPar es un modelo abierto para calcular las propiedades ópticas de partículas, desarrollado y actualizado a la versión R2019b del software comercial MatLab por el Grupo de Combustibles y Motores (GCM) de la Universidad de Castilla-La Mancha, España. Este modelo está orientado al estudio de aerosoles generados en procesos de combustión.

Paralelamente, OptiPar permite modelar superficies como la nieve y la interacción entre nieve y aerosoles, facilitando el cálculo de las propiedades ópticas del manto nevado con deposición de partículas absorbentes (González-Correa et al., 2022).

Es fundamental entender que el programa funciona mediante una serie de criterios y parámetros que el usuario debe ingresar según la información disponible. Además, OptiPar

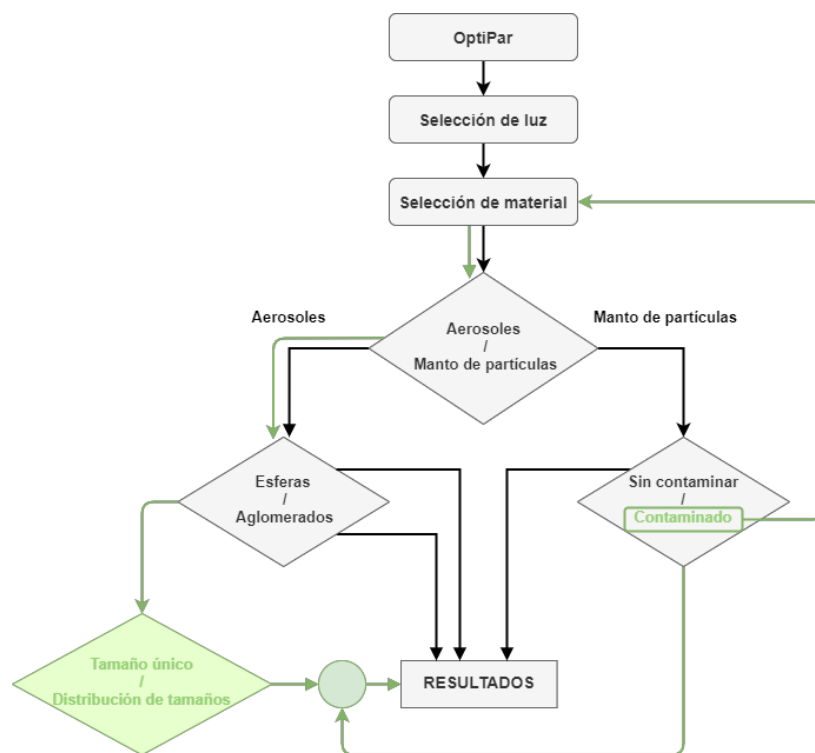
⁹ Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales (GIMSA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia; eduardofontanillada@unimagdalena.edu.co.

incluye balances y cálculos matemáticos que se estructuran automáticamente según el componente seleccionado, en este caso, Black Carbon. Entre los parámetros más relevantes se encuentran: el radio del grano de nieve, el ángulo cenital, la densidad superficial de la nieve, el radio y número de partículas primarias del contaminante, su dimensión fractal, la concentración de BC y el espesor de penetración en la nieve. Es esencial contar con datos lo más reales posibles para obtener resultados precisos.

En la Figura 1 se muestra un bosquejo general de cómo es la modelación en OptiPar donde una vez escogida la fuente de luz y el material a analizar, se debe optar por realizar un estudio de aerosoles o de mantos de partículas. En el primer caso, se calculan las propiedades ópticas de las partículas en función de si dichos aerosoles son esferas o aglomerados de esferas, y en el segundo caso, se calcula la reflectancia si el manto de partículas está contaminado o no. Si se escoge un manto de partículas contaminado (camino verde) es necesario guardar el estudio realizado sobre el manto sin contaminar y volver a escoger el material con el que se quiere contaminar dicho manto. Dicho material (aerosol) puede estar formado por esferas o por aglomerados. En el caso de escogerse aglomerados, estos pueden ser uniformes en tamaño o caracterizarse por una distribución de tamaños (González, 2021).

Figura 1. Esquema del diagrama de flujo de la modelación en OptiPar en relación a estudio de aerosoles y manto de partículas.

Fuente: González, 2021.

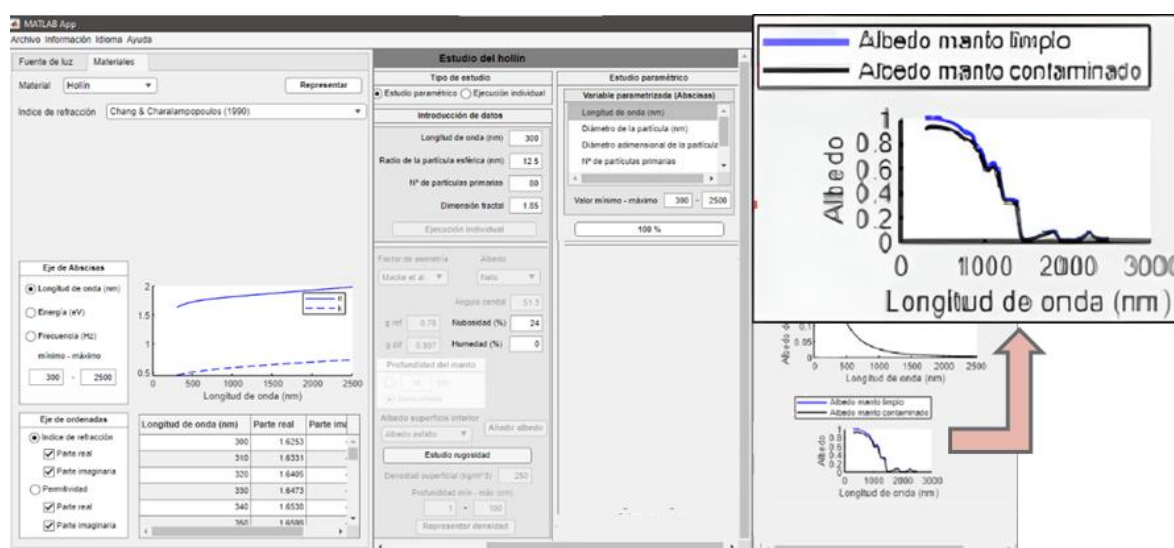


Resultados

La Figura 2 presenta la simulación del albedo espectral para un manto de nieve limpio y uno contaminado con Black Carbon (BC), modelados mediante OptiPar. Se observa que el manto limpio mantiene valores de albedo cercanos a 1 en un amplio rango de longitudes de onda, lo que indica alta reflectancia y, por tanto, menor absorción de energía solar.

En contraste, la simulación correspondiente al manto contaminado evidencia una disminución sistemática del albedo, particularmente en el rango visible, atribuible a la capacidad del BC de absorber radiación y reducir la reflectividad superficial. Esta variación implica un incremento en la energía absorbida por la nieve, favoreciendo procesos de calentamiento y potencial aceleración de la fusión.

Figura 2. Resultados de albedo para un manto nevado simulado y proyectado desde la interfaz de OptiPar.

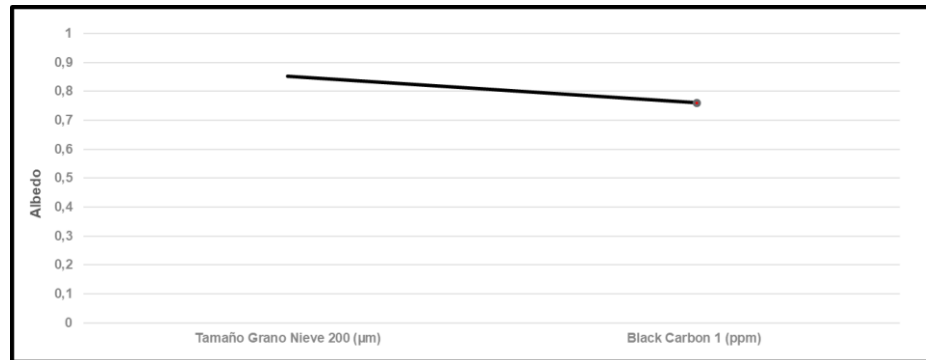


La Figura 3 presenta el albedo medio simulado para un manto de nieve con tamaño de grano de 200 μm y una concentración de 1 ppm de Black Carbon (BC). En condiciones asociadas únicamente al tamaño de grano, el albedo medio alcanza un valor aproximado de 0.85. Sin embargo, al incorporar la concentración de BC, el albedo disminuye hasta $\sim 0,76$, evidenciando una reducción cercana a 0,09 unidades.

Esta variación indica que, aun bajo condiciones de nieve con tamaño de grano relativamente fino-característico de superficies con alta reflectancia, la presencia de BC genera una disminución apreciable en la capacidad reflectiva del manto nevado y oscurecer dicho manto. El resultado resalta la influencia del contaminante sobre el balance radiativo superficial, al incrementar la fracción de energía absorbida.

En términos relativos, la reducción observada sugiere que pequeñas concentraciones de BC pueden producir cambios significativos en las propiedades ópticas de la nieve, lo que refuerza la necesidad de considerar este forzante en estudios de la criósfera tropical.

Figura 3. Albedo medio para un manto nevado en función al tamaño de grano de nieve y la concentración contaminante, simulado en OptiPar.



Conclusiones

La presencia de Black Carbon (BC) sobre los glaciares disminuye el albedo, reduciendo su capacidad de reflejar la radiación solar y aumentando la absorción de energía de onda corta. Debido a su color oscuro y alta capacidad de absorción, el BC ennegrece la superficie glaciar, incrementa la transferencia de calor y acelera el derretimiento de nieve y hielo, contribuyendo a la pérdida de masa glaciar (ANAIGEM, 2018).

En este contexto, OptiPar es un modelo abierto que permite estimar las propiedades ópticas de las partículas mediante su modelado geométrico, incorporando la morfología para mejorar la precisión de los resultados (González, 2021). Entre los principales parámetros de entrada se incluyen el radio del grano de nieve, el ángulo cenital, la densidad superficial de la nieve, el radio y número de partículas primarias del contaminante, su dimensión fractal, la concentración de BC y el espesor de penetración en la nieve.

Referencias

- ANAIGEM. (2018, 23 de mayo). Impacto del carbono negro en los glaciares de la Cordillera Blanca. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. <https://www.inaigem.gob.pe/2018/05/23/impacto-delcarbono-negro-en-los-glaciares-de-la-cordillera-blanca/>
- Díaz, C. (2016, octubre). Estudio del carbono negro (black carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos [Tesis de maestría, CIMAV Repositorio]. https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2244/1/CARLOS%20DIAZ_TESIS%20MCTA.pdf
- Flanner, M. G., Zender, C. S., Randerson, J. T., & Rasch, P. J. (2007). Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11), D11202. <https://doi.org/10.1029/2006JD008003>
- González-Correa, S., Gómez-Doménech, D., Ballesteros, R., Lapuerta, M., Pacheco-Ferrada, D., Flores, R. P., Castro, L., Fadic, X., & Cereceda-Balic, F. (2022). Impact of vehicle

soot agglomerates on snow albedo. *Atmosphere*, 13(5), 801.
<https://doi.org/10.3390/atmos13050801>

- González, S. (2021). Revisión de métodos para el cálculo de las propiedades ópticas de aglomerados de hollín [Proyecto Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha].
- Hadley, O. L., Corrigan, C. E., Kirchstetter, T. W., Cliff, S. S., & Ramanathan, V. (2010). Measured black carbon deposition on the Sierra Nevada snow pack and implication for snow pack retreat. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(17), 7505–7513.
<https://doi.org/10.5194/acp-10-7505-2010>
- Hansen, J., & Nazarenko, L. (2004). Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(2), 423–428.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2237157100>
- Huovinen, P., Ramírez, J., & Gómez, I. (2018). Remote sensing of albedo-reducing snow algae and impurities in the Maritime Antarctica. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 507–517. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.015>
- Molina, L. T., Andrade, M., Baumgardner, D., Casassa, G., Dawidowski, L., Garreaud, R., Huneeus, N., & Lambert, F. (2015). Pollution and its impacts on the South American cryosphere. *Earth's Future*, 3(12), 1–26. <https://doi.org/10.1002/2015EF000311>

Cambio climático y retroceso glaciar en la cordillera blanca

Luzmila Dávila Roller¹⁰

Introducción

El retroceso glaciar constituye una de las manifestaciones más visibles e impactantes del cambio climático a escala global (IPCC, 2019). Los glaciares tropicales de los Andes peruanos, concentrados principalmente en la Cordillera Blanca, representan la mayor extensión de hielo tropical del mundo, con aproximadamente 1000 km² de cobertura glaciar (Rabatel et al., 2013). En los últimos 58 años, los Andes peruanos han perdido el 56,22% de su superficie glaciar, proceso que se ha acelerado significativamente desde la segunda mitad del siglo XX (INAIGEM, 2023). El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) lidera el monitoreo sistemático de los glaciares peruanos, desarrollando investigaciones en 20 cordilleras nevadas a nivel nacional. Sus actividades abarcan el monitoreo directo e indirecto del balance de masa glaciar, el estudio de carbono negro y el seguimiento de peligros de origen glaciar, información esencial para la gestión del recurso hídrico y la reducción del riesgo de desastres (Vuille et al., 2008; Zemp et al., 2019).

El objetivo de esta presentación es exponer las principales evidencias del retroceso glaciar en la Cordillera Blanca, analizar los factores climáticos que lo impulsan, y describir las consecuencias sobre los recursos hídricos y la seguridad de las poblaciones andinas, en el marco del sistema de monitoreo del WGMS (2023).

Palabras clave: Glaciares tropicales; Cordillera Blanca; Retroceso glaciar; Cambio climático; INAIGEM; Perú.

Materiales y Métodos

Definición y Tipos de Glaciares

Un glaciar es una masa de hielo, firn y nieve que se origina en la superficie terrestre como resultado del proceso de acumulación, posterior compactación y recristalización de nieve u otras formas de precipitación sólida, que muestran evidencia de flujo a lo largo del tiempo (Francou & Vincent, 2007). Se distinguen tres tipos principales según su cobertura superficial: glaciares libres de detritos, glaciares cubiertos de detritos y glaciares rocosos, cada uno con dinámicas propias de respuesta ante el cambio climático.

¹⁰ Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Perú; ldavila@inaigem.gob.pe

Tabla 1. Tipos de glaciares: libres de detritos, cubiertos de detritos y rocosos. Fuente: INAIGEM



Lagunas de Origen Glaciar

Las lagunas de origen glaciar son depósitos de agua formados como resultado de la deglaciación reciente o antigua, alimentados principalmente por el flujo generado durante el derretimiento glaciar (ANA, 2014). Se clasifican en lagunas periglaciales, proglaciales y supraglaciales, según su posición relativa respecto al cuerpo de hielo. El INAIGEM ha identificado 528 lagunas con riesgo de desborde a nivel nacional, constituyendo una amenaza directa para las poblaciones asentadas en las zonas bajas (INAIGEM, 2023).

Figura 2. Tipos de lagunas de origen glaciar: periglaciales, proglaciales y supraglaciales. Fuente: INAIGEM.



Ámbito de Monitoreo del INAIGEM

El INAIGEM desarrolla su ámbito de acción en 20 cordilleras glaciares a nivel nacional. Entre los principales trabajos desarrollados se incluyen: el monitoreo de glaciares mediante métodos directos e indirectos, el cálculo del balance de masa glaciar, el estudio de

carbón negro y el monitoreo de peligros de origen glaciar. La institución provee información estratégica sobre el recurso hídrico andino para la planificación territorial y la gestión del riesgo de desastres (Rabatel et al., 2020; Schoolmeester et al., 2018).

Resultados

Pérdida de Superficie Glaciar a Nivel Nacional

Los inventarios glaciares realizados por el INAIGEM evidencian una pérdida dramática y sostenida de la superficie glaciar peruana. En 1982 el país contaba con 2399,06 km² de cobertura glaciar; para 2016 esta cifra se había reducido a 1118,11 km², y en 2020 apenas alcanzaba los 1050,31 km², lo que equivale a una pérdida del 56,22% en 58 años (INAIGEM, 2023). La Cordillera Blanca, pese a ser la más extensa, también registra pérdidas significativas: de 726,51 km² en 1962 a 424,86 km² en 2020 (Rabatel et al., 2013; ANA, 2014).

Figura 3. Pérdida de superficie glaciar a nivel nacional en los últimos 58 años. Fuente: INAIGEM.



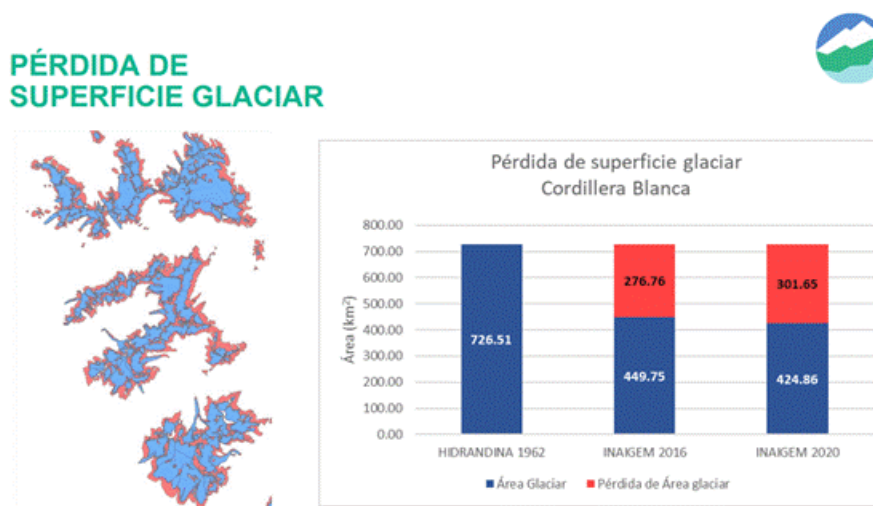
Pérdida por Cordillera: Cordillera Blanca

A nivel de cordilleras, la Blanca registra las mayores pérdidas absolutas de superficie por su extensión, con el glaciar Artesonraju como uno de los más representativos y monitoreados. La tasa de retroceso en la Cordillera Blanca es de aproximadamente 19 metros por año en promedio, mientras que glaciares como el Pastoruri han retrocedido más de 650 metros entre 1980 y 2019 (Vuille et al., 2008; Zemp et al., 2019).

Figura 4. Pérdida de superficie glaciar por cordillera en 58 años.



Figura 5. Pérdida en la Cordillera Blanca



Evidencias de Pérdida de Volumen: Glaciares Huilca y Gueshgue

El monitoreo volumétrico de glaciares individuales confirma la aceleración del proceso de pérdida de masa. El glaciar Huilca perdió 6 millones de m³ de agua entre 2018 y 2025, de los cuales 4 millones (74% del total) se perdieron únicamente entre 2022 y 2024. Por su parte, el glaciar Gueshgue registró una pérdida de 9 millones de m³ de hielo entre 2020 y 2025, con 7 millones de m³ fundidos entre 2022 y 2025, equivalente al 92% de la pérdida total del período (INAIGEM, 2023; Francou & Vincent, 2007).

Figura 6. Pérdida de volumen glaciar: Glaciar Huillca

GLACIAR HUILLCA



En los años 2018 al 2025, se perdió un volumen total de má de **-6 millones de m³ de agua.**

Pero durante el 2022 al 2024 (2 años de análisis), la pérdida fue de **-4 millones de m³ de agua** (74% de pérdida).

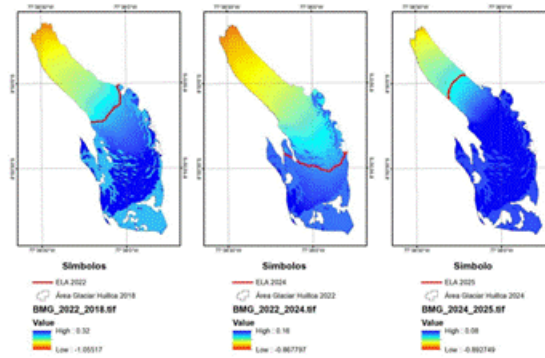


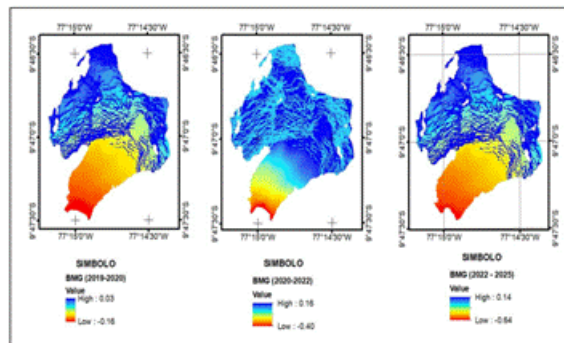
Figura 7. Pérdida de volumen glaciar: Glaciar Gueshgue

GLACIAR GUESHGUE



Durante el periodo 2020 al 2025 (5 años), se perdió **-9 millones de m³ de hielo.**

Durante el 2022 al 2025 (3 años de análisis), la fusión fue de **-7 millones de m³ de agua.** (92%).



Principales Factores Climáticos del Retroceso Glaciar

El incremento de la temperatura global es el principal motor del retroceso glaciar. Las anomalías anuales de temperatura media global muestran una tendencia ascendente sostenida desde la era preindustrial, con una aceleración notable a partir de la década de 1980 (Organización Meteorológica Mundial, 2025). Adicionalmente, el aumento de focos de calor registrados entre 2019 y 2025 en Sudamérica, identificados mediante la plataforma Fire Information de la NASA, evidencia el incremento de la actividad de quemaz que contribuye

al depósito de carbono negro sobre los glaciares, reduciendo su albedo y acelerando su fusión (IPCC, 2019; Zemp et al., 2019).

Peligros de Origen Glaciar

El derretimiento de glaciares y la alteración del permafrost incrementan el riesgo de avalanchas, deslizamientos y aluviones. Las lagunas proglaciales que se forman como consecuencia del retroceso glaciar constituyen una amenaza latente para las poblaciones aguas abajo, especialmente ante eventos sísmicos o lluvias extremas (Schoolmeester et al., 2018). Ante esta situación, el INAIGEM realiza: evaluación del peligro y monitoreo de lagunas y glaciares potencialmente peligrosos; implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real en lagunas de alto riesgo como Palcacocha (Áncash), Upischocha (Cusco) y Gangrajanca (Huánuco); y asistencia técnica en gestión del riesgo de origen glaciar (INAIGEM, 2023; ANA, 2014).

Conclusiones

El retroceso glaciar en la Cordillera Blanca y, en general, en las cordilleras peruanas constituye una evidencia clara del impacto del cambio climático sobre los ecosistemas de alta montaña. Los datos del **INAIGEM** confirman que en los últimos 58 años el Perú ha perdido aproximadamente el 56,22 % de su superficie glaciar, con una aceleración particularmente marcada durante la última década (INAIGEM, 2023; Rabatel et al., 2013). Este fenómeno se refleja también en glaciares específicos como Huillca y Gueshgue, donde la pérdida de volumen ha ocurrido a tasas cada vez más rápidas: cerca del 74 % y 92 % de su pérdida total se ha registrado solo en los últimos dos o tres años, respectivamente (INAIGEM, 2023). Entre los principales factores que impulsan este retroceso se encuentran el incremento sostenido de la temperatura global y el aumento de focos de calor, procesos que además se ven intensificados por el depósito de carbono negro sobre la superficie de los glaciares, lo cual reduce su albedo y acelera la fusión (IPCC, 2019; Zemp et al., 2019). Como consecuencia de esta dinámica, se han identificado a nivel nacional 528 lagunas con riesgo potencial de desborde, las cuales representan una amenaza directa para cientos de miles de personas y hacen necesaria la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real y estrategias integrales de gestión del riesgo (Schoolmeester et al., 2018; ANA, 2014). En este contexto, el monitoreo sistemático desarrollado por el INAIGEM, en articulación con la red global del WGMS, resulta fundamental para generar información científica que permita orientar la toma de decisiones relacionadas con la adaptación al cambio climático y la gestión del recurso hídrico en los Andes peruanos (WGMS, 2023; Vuille et al., 2008). Asimismo, la desaparición progresiva de los glaciares no solo implica una reducción en la disponibilidad futura de agua, sino también la pérdida de valores culturales, paisajísticos y espirituales profundamente arraigados en las comunidades andinas que históricamente han convivido con estos ecosistemas de montaña (Rabatel et al., 2020; Francou & Vincent, 2007).

Referencias

- ANA. (2014). Inventario nacional de glaciares y lagunas. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- Francou, B., & Vincent, C. (2007). *Les glaciers à l'épreuve du climat*. IRD Éditions.
- INAIGEM. (2023). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar 2023. Huaraz, Perú: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/499>
- IPCC. (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (2025). Anomalías anuales de la temperatura media global con respecto a una referencia preindustrial (1850–1900).
- Rabatel, A., et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective. *The Cryosphere*, 7, 81–102.
- Rabatel, A., et al. (2020). A review of the current state and recent changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8.
- Schoolmeester, T., et al. (2018). *The Andean Glacier and Water Atlas*. UNESCO/GRID-Arendal.
- Vuille, M., Kaser, G., & Juen, I. (2008). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, 62(1–2), 14–28.
- WGMS. (2023). Global Glacier Change Bulletin No. 5. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service. <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09>
- Zemp, M., et al. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise. *Nature*, 568, 382–386.

Cambio climático

Más allá del análisis satelital: Desafíos y oportunidades metodológicos en la caracterización de incendios en ecosistemas de alta montaña, Colombia, revisión sistémica de evidencias.

Sindy Bolaño-Díaz¹¹; Geraldine M. Pomares-Meza¹²

Introducción

Los páramos son ecosistemas clave para la regulación hídrica y la captura de carbono, posicionándolos como estratégicos en la lucha contra el cambio climático en Colombia, como consecuencia directa que aproximadamente el 2% la superficie terrestre nacional representa este tipo de ecosistema (Morales et al., 2007; Murad et al., 2024), la cual está vinculada con la generación del 70% de agua para el consumo humano en el país (Alavi-Murillo et al., 2022; Díez-Echavarría et al., 2025; Veloza et al., 2025).

Debido a la sensibilidad de estos ecosistemas estratégicos, se intensifica su vulnerabilidad ante un escenario de aumento generalizado de la temperatura de la superficie, ocasionando la presencia de elementos y/o fenómenos atípicos en estas zonas, como lo son incendios forestales, que son un fenómeno accionado tanto por influencia antropogénica, asociados principalmente a los cambios en el uso de la tierra (Camargo Caicedo et al., 2025), como por anomalías climáticas (Morton et al., 2006; Parra-Lara et al., 2025).

Es bajo este panorama de vulnerabilidad donde se hacen aún más evidentes las limitaciones existentes en la actualidad con respecto a la caracterización del fuego, puesto que los productos de sensoramiento remoto frecuentemente utilizados para análisis difieren a menudo, tanto en temporalidad como en espacialidad, del grado de pragmatismo que exige la gestión operativa del fuego (Hunter et al., 2020), sobre todo en estos ecosistemas que presentan de alta heterogeneidad espacial y donde los eventos suelen ser de menor magnitud (Madriral et al., 2022).

Aunque hoy la dinámica del fuego está ampliamente documentada en diversos biomas alrededor del mundo (UNEP, 2022), aún se requiere mejor precisión en la interconexión de variables para entender el problema de forma holística y así orientar soluciones basadas en ecosistemas ante el cambio climático. La presente ponencia presenta una revisión sistemática de los principales desafíos metodológicos reportados para estudiar incendios en ecosistemas de páramo, con énfasis en sus implicaciones para la estimación de emisiones de carbono (CO₂) y el déficit hídrico.

¹¹

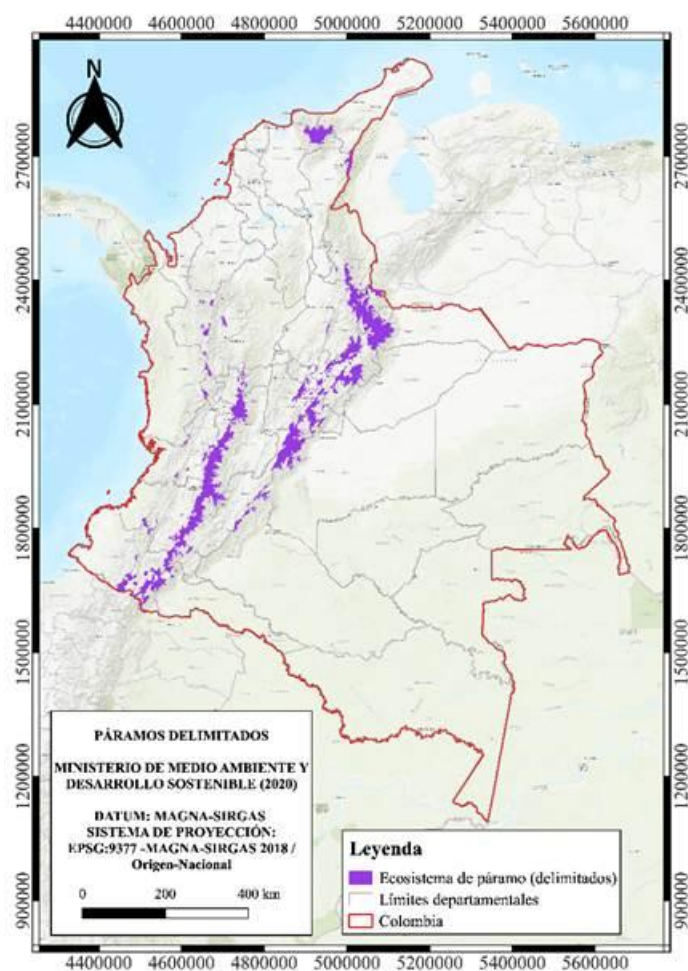
¹²

Palabras clave: Cambio climático, ecosistema, incendios forestales, páramo, recursos hídricos.

Materiales y métodos

El reto de caracterizar incendios de cobertura en los páramos delimitados en Colombia (Figura 1) radica en que, aunque su incidencia suele ser menor que en ecosistemas de baja montaña como el bosque seco tropical o el bosque húmedo tropical (Beltran Polo, 2020), las condiciones de peligro riesgo no son despreciables debido a la persistencia de factores desencadenantes, entre ellos la variabilidad climática asociada a El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), propulsor de periodos de sequía estacional, así como los cambios de uso del suelo para ganadería, agricultura e infraestructura, especialmente en páramos ubicados en zonas de interfaz urbano-rural (Camargo Caicedo et al., 2025), puesto que aquellos localizados en alta montaña poseen cierto blindaje socioambiental, específicamente relacionado con prácticas de protección territorial en contextos comunitarios (Quiroga Palacio, 2017).

Figura 1. Áreas de ecosistemas de páramo delimitados en Colombia.



Tomando como referente el alcance temático de revisión sistemático, el análisis exhaustivo de literatura se construyó a partir de una estrategia de búsqueda orientada a identificar estudios modelo que permitieran identificar las limitaciones existentes en la caracterización del fuego en ecosistemas de páramo en Colombia, mediante el abordaje de simultáneo de al menos dos (2) de estos ejes: incendios forestales, carbono, recursos hídricos y cambio climático. Para lograr esto, en la búsqueda preliminar se emplearon tesauros y como “*Colombian*” + “*paramo*” + “*fires*” + “*water footprint*” / “*carbon footprint*”, además de equivalentes cercanos, y los resultados se organizaron de acuerdo con el esquema ilustrado en la Figura 2.

Figura 2. Esquema temático de la revisión sistemática.



Posteriormente, se aplicó la metodología PRISMA para estructurar la revisión (García Fernández de Castro y Jabba Molinares, 2023). Inicialmente se identificaron 30 artículos en *IOP Publishing*, *MDPI*, *ResearchGate*, *SpringerNatureLink* y *ScienceDirect*. De esta lista se excluyeron los trabajos con fecha de publicación superior a 10 años, quedando 21. Luego, se eliminaron 5 por centrarse en pérdida de biodiversidad sin relación directa con estrés hídrico o forzamiento radiativo, y 3 por desarrollarse en ecosistemas andinos de Ecuador, seleccionándose finalmente 13 artículos. Los hallazgos se consolidaron en una tabla de síntesis con las columnas: AE Páramos (Sí/No según el área de estudio), Carbono (Sí/No si aborda emisiones de Gases de Efecto Invernadero), Agua (Sí/No si analiza efectos del fuego sobre estrés o déficit hídrico), SSP/Futuro (Sí/No si incorpora escenarios de cambio climático) y Limitaciones, que se identificaron mediante el análisis integral de los resultados lógicos.

Resultados

De los 13 artículos que superaron el filtrado, solo cuatro (4) abordaron de forma íntegra, no meramente contextual, al menos dos de los ejes temáticos definidos, siendo la combinación más recurrente la caracterización del fuego en páramos con implicaciones sobre carbono (Tabla 1). Aun así, en conjunto la evidencia revela una brecha entre la escala disponible de los productos satelitales y agregaciones climáticas con su traducción a decisiones operativas, lo que conlleva a una baja estandarización para definir y reportar el “incendio” como evento disruptivo, delegándose frecuentemente esta distinción en la capacidad de respuesta institucional de la zona de estudio. Esta discordancia sugiere que, aunque el sensoramiento remoto es una herramienta valiosa, sus escalas no siempre se ajustan a las necesidades de manejo.

Tabla 1. Matriz final de artículos filtrados a través de metodología PRISMA.

Tabla 1. Matriz final de artículos filtrados a través de metodología PRISMA.

Artículo	AE Páramos	Carbono	Agua	SSP/Futuro	Limitaciones
(Obando-Cabrera et al., 2025)	Sí	No	No	No	Se centran en el mapeo de la distribución y frecuencia, pendiente conectar con el funcionamiento ecológico y futuro climático.
(Borrelli et al., 2015)	Sí	No	No	No	Mapea las áreas quemadas en los páramos andinos, sugiere investigar los impactos en las funciones naturales de estos ecosistemas.
(Quiroga Palacio, 2017)	Sí	No	No	No	Analiza incendios para proponer la ecología del fuego como alternativa a la supresión tradicional. No se evidencia conexión con variables climatológicas y escenarios de cambio climático.
(Benavides et al., 2023)	Sí	Sí	No	No	Cuantifica emisiones de CH ₄ en las turberas andinas. No conecta con distribución espaciotemporal de incendios ni con impacto hídrico.
(Montes-Pulido et al., 2025)	Sí	Sí	No	No	Centrado en comprender los impulsores de la variación del Carbono Orgánico del Suelo (COS) y el Carbono Pirogénico del Suelo (CyP) y su papel en los ecosistemas naturales. No usa metodología de estimaciones de carbono en

					sector agrícola, forestal y uso de la tierra de acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC AFOLU) ni proyecta bajo escenarios climáticos.
(Skillings-Neira et al., 2025)	Sí	Sí	No	No	Mapea turberas (6-18% del páramo). Estima almacenamiento potencial pero no cuantifica emisión por incendio ni vincula con datos hidrológicos.
(Lazo et al., 2019)	No	No	Sí	No	Busca comprender cómo las cuencas montañosas tropicales almacenan y liberan agua, y los servicios ecosistémicos hídricos resultantes que brindan.
(Villa et al., 2019)	No	Sí	No	No	Cartografía stocks de carbono edáfico; el desafío es vincular estas reservas con regímenes de incendios y proyecciones hídricas futuras.
(Gaffney et al., 2024)	Sí	No	Sí	Sí	Busca analizar impactos climáticos en alta montaña; el reto es generar evidencia empírica acoplada sobre incendios, carbono y servicios hídricos.
(Cabrera et al., 2024)	Sí	No	No	No	Enfoque regional basado en puntos calientes y vinculación de forzamiento climático a resolución mediana, por lo que no analiza quemas pequeñas. No adopta protocolos índices de severidad ni relaciona el fuego con emisiones o estrés hídrico post-fuego.

(Solarte Erazo et al., 2026)	No	Sí	No	No	Análisis sobre dinámica socioecológica donde el fuego aparece como disturbio, pero sin métricas estandarizadas de caracterización (área/severidad/intensidad). Presenta evidencia heterogénea en escalas y métodos, ni evalúa directamente efectos del fuego sobre déficit hídrico.
(Ocampo-Zuleta y Parrado-Rosselli, 2023)	Sí	No	No	No	Estudio local, por lo que presenta alta resolución ecológica, no obstante, posee baja extrapolación. Severidad inferida con Índice de Vegetación Normalizada (NDVI). Reconoce limitaciones por calidad de los datos para régimen de fuego.
(Espinoza et al., 2022)	Sí	No	No	No	Estudio retrospectivo basado en paleo-fuego aplicando protocolo estandarizado para tendencias holocénicas, pero resolución temporal poco útil para gestión operativa y manejo integral de episodios de quemas intencionadas, y la hidrología es vinculada únicamente en la descripción del área de estudio.

De forma llamativa, la estandarización metodológica más robusta se observa sobre todo en estudios paleoecológicos, útiles para tendencias de largo plazo, pero débiles bajo un escenario de riesgo climático prospectivo. Además, pese a que los trabajos incluidos en la matriz cumplieron los criterios metodológicos, se identificaron tres artículos que, aunque analizan cuencas montañosas o estribaciones de macizos, no corresponden estrictamente a

páramo, lo que refuerza la limitación espacial de las herramientas actuales para caracterizar zonas topográficamente complejas. Finalmente, ninguno vincula explícitamente el fuego con déficit hídrico post-incendio, evidenciando una brecha de conocimiento crítica en ecosistemas clave para la regulación hídrica y la soberanía del agua en Colombia.

Conclusiones

Como consideraciones finales se pueden resaltar dos grandes hallazgos:

- a. Se evidencia que la distribución espaciotemporal de incendios en ecosistemas de alta montaña ha sido documentada ampliamente, pero la conexión empírica e integrada entre incendios, emisiones de carbono, impacto hídrico y escenarios de riesgo futuro bajo cambio climático permanece sin resolver para los ecosistemas de alta montaña colombianos.
- b. En cuanto a las limitaciones de tipo metodológico, se pueden establecer dos tipos: 1) limitaciones de escala espaciotemporal que reducen la utilidad operativa de los productos de monitoreo del fuego, especialmente en eventos pequeños y heterogéneos; y 2) ausencia de protocolización en la medición y reporte de variables de fuego, lo que limita la comparabilidad y su integración con marcos consolidados de variables hidrológicas.

Referencias

- Alavi-Murillo, G., Diels, J., Gilles, J., & Willems, P. (2022). Soil organic carbon in Andean high-mountain ecosystems: Importance, challenges, and opportunities for carbon sequestration. *Regional Environmental Change*, 22(4), 128. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01980-6>
- Beltran Polo, Y. T. (2020). Estudio y localización de lagos de alta montaña de la sierra nevada de Santa Marta en el departamento del Magdalena. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería
- Benavides, J. C., Rocha, S., & Blanco, E. A. (2023). Spatial and temporal patterns of methane emissions from mountain peatlands in the northern Andes across a disturbance gradient. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1078830>
- Borrelli, P., Armenteras, D., Panagos, P., Modugno, S., & Schütt, B. (2015). The Implications of Fire Management in the Andean Paramo: A Preliminary Assessment Using Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing*, 7(9), 11061-11082. <https://doi.org/10.3390/rs70911061>
- Cabrera, A., Ferro, C., Casallas, A., & López-Barrera, E. A. (2024). Wildfire Scenarios for Assessing Risk of Cover Loss in a Megadiverse Zone within the Colombian Caribbean. *Sustainability*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/su16083410>

- Camargo Caicedo, Y., Bolaño-Díaz, S., Pomares-Meza, G. M., Pérez-Pérez, M., Soro, T. D., Bolaño-Ortiz, T. R., & Vélez-Pereira, A. M. (2025). Hydroclimatic and Land Use Drivers of Wildfire Risk in the Colombian Caribbean. *Fire*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/fire8060221>
- Díez-Echavarría, L., Villegas-Palaciob, C., & Arango-Aramburo, S. (2025). Scaling the Landscape: Revealing Land Use and Cover Change Patterns in the Colombian Andes. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*, 18(2), 48-62. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-3804>
- Espinoza, I. G., Franco-Gaviria, F., Castañeda, I., Robinson, C., Room, A., Berrío, J. C., Armenteras, D., & Urrego, D. H. (2022). Holocene Fires and Ecological Novelty in the High Colombian Cordillera Oriental. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.895152>
- Gaffney, P. P. J., Tang, Q., Li, Q., Zhang, R., Pan, J., Xu, X., Li, Y., & Niu, S. (2024). The impacts of land-use and climate change on the Zoige peatland carbon cycle: A review. *WIREs Climate Change*, 15(1), e862. <https://doi.org/10.1002/wcc.862>
- García Fernández de Castro, E. J., & Jabba Molinares, D. (2023). Literature Review: Latency Compensation Techniques for Online Gaming under an IoT Approach. 2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3), 1-6. <https://doi.org/10.1109/C358072.2023.10436174>
- Hunter, M. E., Colavito, M. M., & Wright, V. (2020). The Use of Science in Wildland Fire Management: A Review of Barriers and Facilitators. *Current Forestry Reports*, 6(4), 354-367. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00127-2>
- Lazo, P. X., Mosquera, G. M., McDonnell, J. J., & Crespo, P. (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in Andean Páramo catchments. *Journal of Hydrology*, 572, 805-819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.050>
- Madrigal, J., Espinosa, J., Vidal-Cordero, J., Carro, F., Almodóvar, J., Mateo, J., Senra, F., Martín, M., Muñoz-Reinoso, J., Prats, S., Martín-Pinto, P., Jiménez, E., Fonturbel, T., Vega, J., Moya, D., Heras, J., Lucas-Borja, M. E., Guijarro, M., Carrillo-García, M., & Cerdá, X. (2022). Efecto del fuego en los ecosistemas: Resultados de quemas experimentales en espacios protegidos (pp. 135-150).
- Montes-Pulido, C. R., Bird, M. I., da Silva Carvalho, L. C., Serrano, J., Quesada, C. A., & Feldpausch, T. R. (2025). Climatic and Edaphic Drivers of Soil Organic Carbon and Pyrogenic Carbon Stocks Across Elevation and Disturbance Gradients in Colombian Andean Forests. *Global Change Biology*, 31(7), e70135. <https://doi.org/10.1111/gcb.70135>

- Morales, M., Otero García, J., Hammen, T., Torres Perdigón, A., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourth, J., Olaya, E., Posada, E., Cardenas, L., & Cadena-Vargas, C. (2007). Atlas de páramos de Colombia.
- Morton, D. C., DeFries, R. S., Shimabukuro, Y. E., Anderson, L. O., Arai, E., del Bon Espirito-Santo, F., Freitas, R., & Morissette, J. (2006). Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39), 14637-14641. <https://doi.org/10.1073/pnas.0606377103>
- Murad, C. A., Pearse, J., & Huguet, C. (2024). Multitemporal monitoring of paramos as critical water sources in Central Colombia. *Scientific Reports*, 14(1), 16706. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67563-z>
- Obando-Cabrera, L., Díaz-Timoté, J. J., Bastarrika, A., Celis, N., & Hantson, S. (2025). The Paramo Fire Atlas: Quantifying burned area and trends across the Tropical Andes. *Environmental Research Letters*, 20(5), 054019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adc8ba>
- Ocampo-Zuleta, K., & Parrado-Rosselli, Á. (2023). Functional diversity in an Andean subpáramo affected by wildfire in Colombia. *Plant Diversity*, 45(4), 385-396. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.11.007>
- Parra-Lara, Á. del C., Castro, H. U., & Parra-Muñoz, E. (2025). Incendios de cobertura vegetal, biodiversidad y gobernanza. *Revista Controversia*, (224), 1-15. <https://doi.org/10.54118/controver.vi224.1360>
- Quiroga Palacio, M. E. (2017). Ecología del fuego, una forma de entender el manejo de los incendios forestales en el Parque Ecológico Distrital de Montaña Entrenubes. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/698>
- Skillings-Neira, P. N., Benavides, J. C., Battaglia, M. J., Chimner, R. A., Bourgeau-Chavez, L., Wayson, C., Kolka, R., & Lilleskov, E. A. (2025). Mapping the distribution and condition of mountain peatlands in Colombia for sustainable ecosystem management. *Journal of Environmental Management*, 380, 124915. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124915>
- Solarte Erazo, Y., Pérez, E. H., Solarte, M. E., Méndez Rodríguez, C., & Ruiz Ordoñez, D. M. (2026). Carbon sequestration and socioecological dynamics in páramo ecosystems: A systemic approach to environmental sustainability. *Environmental Research Communications*, 8(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ae44eb>
- UNEP. (2022). Waves of extreme wildfires. En *Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches – Emerging Issues of Environmental Concern* (pp. 24-37). United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/frontiers-2022-noise-blazes-and-mismatches>

- Veloza, P., Rozo, A., Segura, L., Cabrera, M., Niño, F., Prado-Castillo, L. F., & Benavides, J. C. (2025). Spatial patterns of above-ground biomass in tropical alpine páramo ecosystems using allometric models and LiDAR data. *Landscape Ecology*, 40(7), 146. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02159-0>
- Villa, J. A., Mejía, G. M., Velásquez, D., Botero, A., Acosta, S. A., Marulanda, J. M., Osorno, A. M., & Bohrer, G. (2019). Carbon sequestration and methane emissions along a microtopographic gradient in a tropical Andean peatland. *Science of The Total Environment*, 654, 651-661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.109>