

Monitoreo integrado en socioecosistemas de alta montaña: análisis a escala de paisaje en la cuenca del río Claro, Colombia

Jorge Adrián Castaño¹, Luis D. Llambí^{2,3}, Víctor Mauricio Aristizábal⁴, Ana Belén Hurtado-M.⁵, Natalia Norden⁵, Camilo Eduardo Rodríguez⁵, Edgar A. Blanco⁶, Jorge Luis Ceballos⁶

¹ Fundación Instituto de Pensamiento Complejo, Colombia

² Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina, Ecuador

³ Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Universidad de Los Andes, Venezuela

⁴ SIE Ingeniería, Colombia

⁵ Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Colombia

⁶ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia

Resumen

En este artículo compartimos los principales resultados y reflexiones de un ejercicio piloto a escala de paisaje, de la Estrategia para Monitoreo Integrado de los Ecosistemas de Alta Montaña de Colombia (EMA). Se presenta una síntesis del Reporte sobre el estado y las dinámicas (RED) en una cuenca emblemática de alta montaña: el río Claro, en el departamento de Caldas. Se parte de una breve descripción de la propuesta conceptual y metodológica para continuar con una síntesis integrada de los resultados, y, finalmente, se discuten sus implicaciones en la gestión sostenible del territorio, los desafíos abiertos y las lecciones aprendidas orientadas a la generación de reportes de estado y dinámicas a escala de paisaje en el marco de la EMA. El enfoque socioecológico y multiescalar propuesto permitió explorar vínculos entre variables respuesta ambientales, ecológicas y sociales, y factores de cambio asociados con las dinámicas del uso del suelo y el cambio climático, a lo largo de gradientes de elevación y transformación. En particular, los cambios identificados en el uso del suelo y coberturas en diferentes pisos altitudinales (principalmente asociados al uso ganadero) mostraron ser elementos clave para interpretar la dinámica de los socioecosistemas e impactos sobre servicios ecosistémicos como la oferta hídrica y la acumulación de carbono.

Palabras clave: Andes tropicales, bosque altoandino, cambio climático, monitoreo integrado, uso del suelo, páramo, complejo de páramos.

Abstract

In this article we share the main results and insights of a pilot exercise at landscape scale, of the Strategy for Integrated Monitoring of the High Mountain Ecosystems of Colombia (EMA), presenting a synthesis of the State and Dynamics Report (RED) of the emblematic Rio Claro (Caldas) high mountain catchment. Starting from a brief description of the conceptual and methodological approach, we present an integrated synthesis of the main results and discuss their implications for sustainable territorial management, open challenges and lessons learnt for the generation of state and dynamics reports in mountain socio-ecosystems at a landscape scale within the EMA framework. The socio-ecological and multiscale approach allowed exploring links between environmental, ecological and social response variables and drivers of change associated with land use and climate change along elevation and transformation gradients. In particular, the changes identified in land use and cover in different elevation belts (mainly linked with cattle grazing), were key to interpret the dynamics of mountain socio-ecosystems and impacts on ecosystem services such as water provision and carbon accumulation.

Keywords: tropical Andes, Andean forests, climate change, integrated monitoring, land use, paramo, paramo complex.

Introducción

Los sistemas montañosos del mundo, que representan solo el 28 % de las tierras emergidas, albergan entre el 40 y el 85 % de las especies de anfibios, aves y mamíferos del planeta, muchas con distribuciones restringidas (Rahbek et al., 2019; Tenorio et al., 2023). Además de su importancia ecológica, en ellos habita cerca del 20 % de la población mundial y cumplen funciones esenciales como la regulación del clima y la provisión de servicios ecosistémicos, entre los que se destaca el suministro de agua para millones de personas (Pepin et al., 2015). En este contexto los Andes tropicales sobresalen como un *hotspot* global de biodiversidad (Myers et al., 2000), con un alto grado de endemismo en plantas y vertebrados (Tenorio et al., 2023) y una notable huella humana, especialmente en los Andes del Norte (Aide et al., 2019; Correa Ayram et al., 2020; Venter et al., 2016).

Factores como el impacto del uso del suelo y el cambio climático antropogénico amenazan la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas montañosos, pues se alteran las relaciones socioecológicas de las cuales depende el bienestar humano (Pauli & Halloy, 2019). Al reconocer esta vulnerabilidad, el Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático (IPCC) incluyó en su informe de 2022 un capítulo especial para las montañas en el que se resalta su sensibilidad ante los cambios ambientales y climáticos (Adler et al., 2022). Bajo este panorama, el monitoreo se ha consolidado como una herramienta esencial para comprender la respuesta de los ecosistemas montañosos a los motores de cambio y orientar el manejo adaptativo mediante alertas tempranas de amenazas y evaluaciones de la efectividad de las intervenciones (Adler et al., 2018; Carilla et al., 2023).

En los Andes se han consolidado diversas redes de monitoreo ecológico de largo plazo, como la iniciativa de monitoreo hidrológico de ecosistemas de alta montaña IMHEA (Ochoa-Tocachi et al., 2018), la red Global Network of Mountain Observatories (GNOMO) de observatorios de alta montaña (Adler et al., 2018), la red GLORIA-Andes que hace seguimiento de la dinámica de la vegetación en cumbres (Cuesta et al., 2017, 2023), el sistema de parcelas permanentes de la Red de Bosques Andinos (RBA) (Malizia et al., 2020) y la Red de Observatorios Socioecológicos de los Andes (ROSA), entre otras (ver revisión en Carilla et al., 2023).

Colombia participa en varias de estas iniciativas, a través de sitios como el observatorio Poleka Kasue de la Escuela de Ingeniería de Antioquía (EIA) en el Parque Nacional Natural (PNN) Los Nevados, el sitio GLORIA de la Sierra Nevada del Cocuy y parcelas permanentes de monitoreo de la RBA en la Cordillera Central. A nivel nacional destacan los esfuerzos liderados por el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), el IDEAM, el Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia y el Instituto Humboldt (Hurtado et al., 2020; Llambí, Becerra, Peralvo, Avella, et al., 2019).

Aunque estas iniciativas posibilitan evaluar aspectos primordiales de la dinámica de ecosistemas montañosos, como los cambios en el clima, las respuestas de la biodiversidad y el almacenamiento de carbono, aún existen limitaciones para valorar los servicios ecosistémicos y comprender las interacciones entre factores sociales, humanos y ambientales. Frente a ello, el IDEAM y el Instituto Humboldt, con el apoyo de CONDESAN, proponen la Estrategia de Monitoreo Integrado de los Socioecosistemas de Alta

Montaña de Colombia (EMA) (IDEAM et al., 2018) como una apuesta para generar y analizar información socioambiental de forma integrada, enfrentar los impactos del cambio climático y del uso del suelo, y orientar la gestión de estos territorios estratégicos como espacios fundamentales en términos de su biodiversidad, servicios ecosistémicos e importancia productiva y cultural (Llambí et al., 2019).

A escala nacional la EMA ha avanzado mediante herramientas como el Protocolo de Monitoreo Integrado y Participativo de la Alta Montaña (PMIP-AM), que define lineamientos, variables y procedimientos para el monitoreo con participación comunitaria (IDEAM, 2022b), y el Primer Reporte Nacional sobre el Estado y Tendencia de la Alta Montaña en Colombia (RET-AM), que consolida información nacional en los diferentes componentes de la EMA (IDEAM, 2022a).

En la EMA se proponen los reportes de estado y dinámicas (RED) —inicialmente denominados Reportes de Estado y Tendencias— a escala de paisajes, como instrumentos para integrar, analizar y relacionar variables ecológicas y sociales en territorios específicos, considerando su dinámica, gobernanza y factores de cambio, como el cambio climático y los procesos políticos, económicos y sociales de contexto (p. ej., el proceso de paz, la Ley de Páramos, los procesos económicos asociados a la globalización económica, etc.), (IDEAM et al., 2018; Llambí et al., 2019).

Se seleccionó la cuenca de alta montaña de río Claro, (Villamaría-Caldas) como ejercicio piloto para la generación de un RED en el marco de la EMA. Este es un sitio donde convergen múltiples iniciativas de monitoreo e investigación: el Observatorio Poleka Kasue; estudios impulsados por el IDEAM sobre variables climáticas, hidrológicas de extensión y masa glaciar; los estudios de cambio en el uso del suelo realizados en el marco del POMCA (Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas) por parte de la autoridad ambiental regional Corpocaldas, del río Chinchiná; y el monitoreo de algunas variables climáticas en el marco del Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC).

El objetivo de este documento es presentar de manera concisa los resultados más relevantes del RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023), utilizando los principios orientadores del enfoque de la EMA (IDEAM et al., 2018). Se incluye una serie de reflexiones y recomendaciones que esperamos sea útil para la elaboración de futuros reportes RED, y la implementación de la EMA en otras zonas de la alta montaña colombiana.

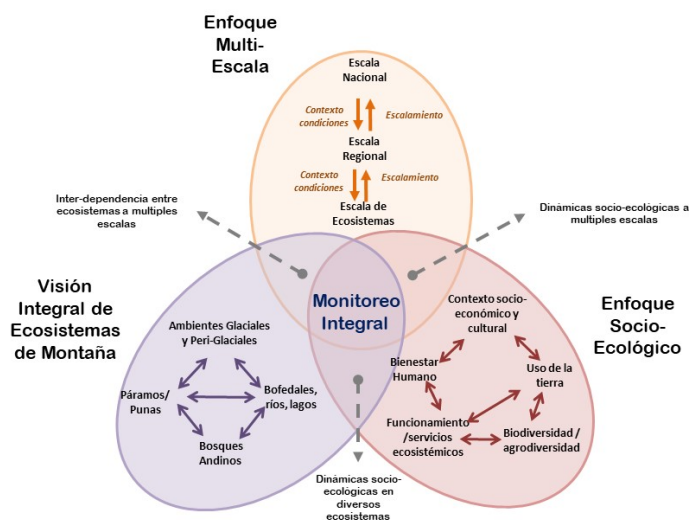
Marco conceptual

En la EMA se propone el monitoreo integrado como un enfoque de manejo adaptativo que permita evaluar el impacto sobre la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el bienestar humano a raíz de cambios en los contextos ambientales, políticos, económicos y sociales. Además, busca aportar insumos para la adaptación al cambio climático, la restauración ecológica y la planificación territorial en sintonía con lo dispuesto en la Ley 1930 (MADS, 2018), conocida como Ley de Páramos. Los objetivos de la estrategia son los siguientes:

- Evaluar el estado actual y las dinámicas de cambio de variables e indicadores vinculados con la integridad ecológica, biodiversidad, funcionamiento, servicios ecosistémicos y bienestar humano en los socioecosistemas altoandinos de Colombia.
- Relacionar estos cambios con los principales factores moduladores de los procesos de transformación que operan a diferentes escalas espacio-temporales incluyendo el cambio climático y las dinámicas demográficas, socioeconómicas y de uso de la tierra.
- Generar información para evaluar la efectividad de las principales estrategias y políticas ambientales y esquemas de gobernanza territorial y orientar los procesos de toma de decisión a diferentes escalas.

En el contexto de la EMA, se entiende el monitoreo integrado como el monitoreo que combina: 1) un enfoque multiescalar, que vincula los *factores/motores de cambio* y las *variables respuestas* desde la escala de parcelas y ecosistemas, pasando por paisajes y regiones, hasta la escala nacional; 2) una visión integral de la alta montaña, donde se analizan las relaciones de interdependencia entre los ecosistemas que componen los paisajes y pisos ecológicos de los Andes tropicales (bosques altoandinos, páramos, humedales, glaciares, etc., y sus diferentes estados de transformación y regeneración), enfatizando en el gradiente altitudinal como factor de cambio, y 3) un enfoque socioecológico y transdisciplinario, en el cual se estudian los vínculos entre el contexto social, económico, cultural y político; los cambios en la dinámica de los sistemas de uso del suelo, y cómo estos interactúan con la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el bienestar humano (Figura 1).

Figura 1. Modelo conceptual de la EMA.



Nota. Llambí et al. (2019).

La estructura del modelo conceptual es la de un socioecosistema representado desde la perspectiva de la teoría de la complejidad como un sistema complejo adaptativo (Castillo-Villanueva & Velázquez-Torres, 2015), integrando múltiples escalas espaciales para la identificación de las relaciones que se configuran entre ellas. Una relación general entre las escalas superiores y las inferiores es el contexto, ya que las variables de una escala inferior siempre estarán determinadas o influenciadas por el contexto que brinda la escala superior.

Por ejemplo, las dinámicas sociales y políticas a escala de paisaje siempre estarán moduladas por variables de la escala nacional, a través de factores como la regulación ambiental y las políticas emitidas por el gobierno nacional. A su vez, la dinámica de las escalas superiores está influenciada por las escalas inferiores, pues estas últimas hacen parte y contribuyen a las propiedades emergentes del sistema.

Los principales factores de cambio o transformación abordados en el RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023) fueron las estrategias gubernamentales de conservación a escala nacional y a escala de paisaje, el clima, las dinámicas sociales y económicas y, de manera transversal, el gradiente altitudinal. Las principales variables respuesta analizadas tienen relación con las coberturas y usos de la tierra, la oferta hídrica, indicadores de biodiversidad —como la abundancia y la riqueza de especies—, el contenido de carbono aéreo y en suelos, y algunos datos asociados a la calidad de vida de los habitantes.

Metodología

El RED río Claro se enmarca dentro de la propuesta de la EMA y se concibe como una herramienta para la comprensión global del estado y las dinámicas del socioecosistema a escala de paisaje, la gestión territorial y la toma de decisiones, mediante un análisis integrado de variables, de relaciones entre escalas y sistemas ecológicos y sociales. Los factores de cambio y variables respuesta se agruparon en cuatro grandes temáticas: 1) coberturas y usos del suelo, 2) biodiversidad y carbono, 3) clima, oferta hídrica y dinámica glaciar, y 4) aspectos socioeconómicos (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

El proceso previo al RED río Claro incluyó un taller en el que se discutieron —con actores clave a nivel nacional— las iniciativas más relevantes de monitoreo, los principales factores de cambio, las variables respuesta y las preguntas de monitoreo que es posible abordar (Llambí, 2018). A partir de esta base, se constituyó un equipo multidisciplinario de trabajo para la elaboración del RED río Claro, liderado por SIÉ Ingeniería y la Fundación IPC, y conformado por investigadoras e investigadores vinculados con la academia local, las autoridades ambientales regionales y con procesos de gestión en el área de estudio. Este equipo recibió la asesoría continua del grupo de trabajo de la EMA, conformado por profesionales del Instituto Humboldt, el IDEAM y CONDESAN.

Para la elaboración del RED río Claro se realizaron reuniones de trabajo con los principales actores vinculados al monitoreo en la zona de estudio, estableciendo acuerdos para el acceso y uso de la información. La Tabla 1 consolida las fuentes y la descripción de la información obtenida en cada área temática.

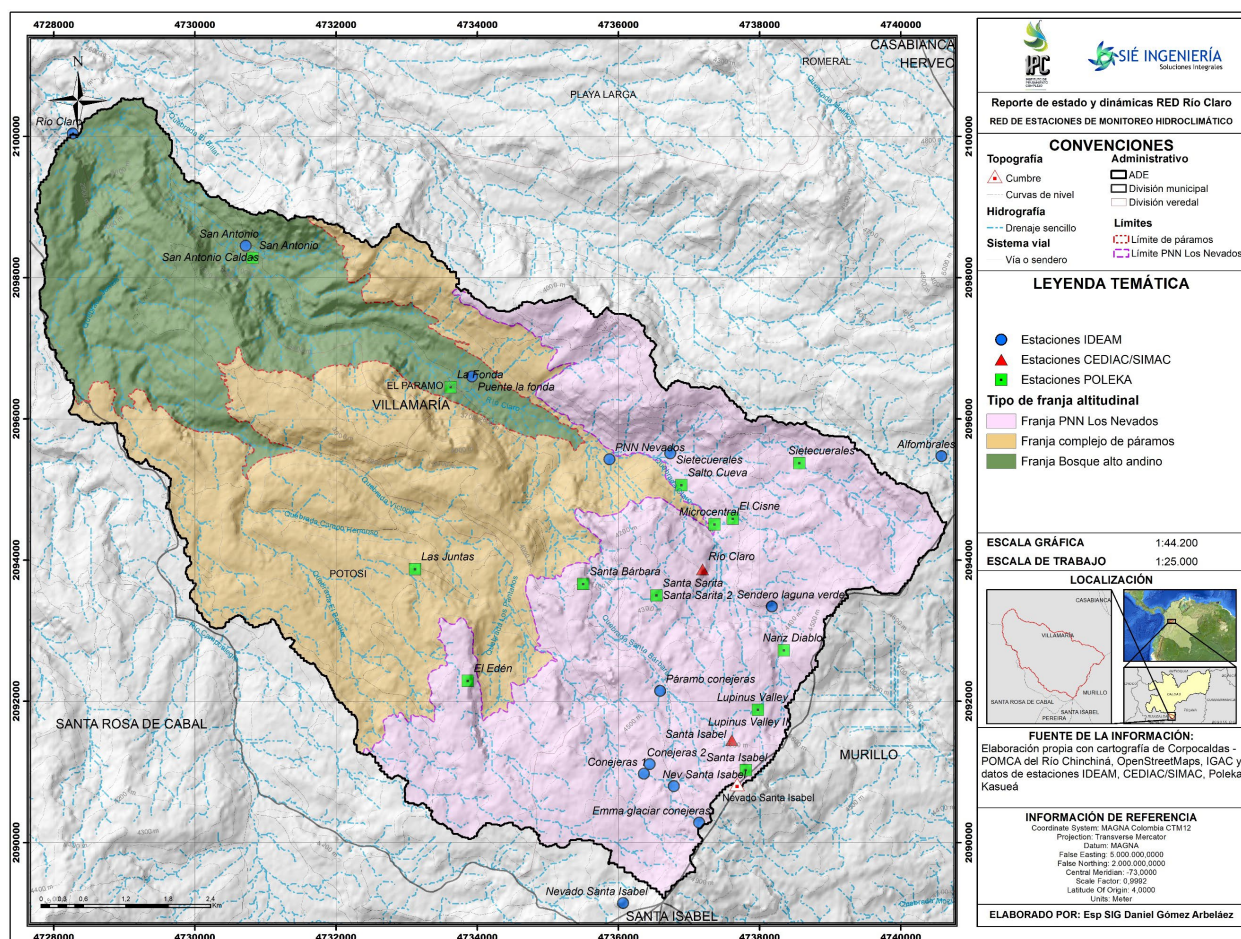
Tabla 1. Fuentes y descripción de información recopilada por áreas temáticas.

Tema	Fuentes y descripción de la información
Coberturas	Se encontró información en fuentes como el Plan de Manejo Ambiental (PMA) del PNN los Nevados, la propuesta de Zonificación Ambiental del Complejo de Páramos Los Nevados, y el POMCA del río Chinchiná. Se priorizó el POMCA por las siguientes razones: 1) cubrimiento completo del área de estudio, 2) cartografía a escala 1:25000, 3) uso de metodología oficial en Colombia para la clasificación de coberturas Corine Land Cover (CLC) y 4) disponibilidad de información para dos diferentes períodos (2006 y 2018). Este último aspecto fue determinante para la observación de dinámicas de cambio y la consecuente respuesta a sus preguntas asociadas. Los análisis se presentaron de manera agregada utilizando el nivel de clasificación 1 del CLC (N1) y de manera desagregada utilizando el nivel 3 del CLC (N3).
Clima e hidrología	La información más relevante provino del IDEAM, del Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CEDIAC), del observatorio Poleka Kasue y del POMCA del río Chinchiná. En este último se encontró un modelo hidrológico agregado, el contexto climático de la región e información espacializada de variables hidrometeorológicas. De las primeras fuentes se obtuvieron series de información de estaciones de monitoreo de temperatura, precipitación, nivel y caudal. Con los caudales fue posible establecer la oferta hídrica del área de estudio y del glaciar Conejeras, cuya dinámica también ha sido monitoreada por el IDEAM. Algunos datos se toman desde del 2009, pero la información es intermitente.
Carbono y biomasa	Desde 2007 el IDEAM ha monitoreado los cambios en los stocks de carbono en siete parcelas permanentes establecidas en el PNN Los Nevados, dentro del área de estudio del RED río Claro (IGAC & Instituto Humboldt, 2018). Dichas parcelas involucran bosque altoandino (dos parcelas), páramos (cuatro parcelas), humedales altoandinos (dos parcelas) y ambientes periglaciares (una parcela), distribuidos a lo largo de un gradiente altitudinal que va desde los 3152 m s. n. m. hasta los 4382 m s. n. m. Adicionalmente, el IDEAM viene estudiando desde el año 2020 el comportamiento de flujos de CO ₂ y metano de dos humedales con diferente grado de intervención antrópica localizados en el PNN Los Nevados y su zona de amortiguación.
Biodiversidad	Los resultados se basan principalmente en inventarios sobre los grupos taxonómicos de plantas, aves, mamíferos, insectos, arácnidos, entognados, malacostraca, diplópodos y quilópodos. La información disponible se presentó de manera agregada, al integrar fuentes diversas como el POMCA del río Chinchiná (UNAL & Corpocaldas, 2014) y la caracterización de flora y fauna del complejo de páramos Los Nevados (WCS & Instituto Humboldt, 2015).
Socioeconómico	Se trabajó con la información oficial sobre el área proveniente del DANE (plataforma REDATAM e informes del Censo poblacional 2018) a escala de secciones censales y de estudios puntuales realizados por actores como la Fundación Las Mellizas, CIIFEN, Corpocaldas, CARDER y la Fundación Pangea (CARDER & PANGAEA, 2020; Friend & Olvera, 2018; Instituto Humboldt & Fundación Ecológica Reserva las Mellizas, 2015).

Con base en las recomendaciones de la EMA para la escala de paisajes, la mayor parte de las variables se analizó teniendo como referente el gradiente altitudinal, dividido en tres franjas altitudinales, cuya delimitación incorpora criterios de gestión del territorio, como el límite del complejo de páramos Los Nevados y el límite del PNN Los Nevados (Figura 2). Dichas franjas facilitan una diferenciación aproximada entre ecosistemas y grados de intervención antrópica y comparten algunas características en sus zonas de contacto.

La primera franja, denominada *bosque altoandino*, tiene su límite inferior en el punto de confluencia de la quebrada Juntas y el cauce de río Claro a 2680 m s. n. m., y va hasta el límite del complejo de páramos Los Nevados. Además, abarca territorios transformados, fragmentos de bosque altoandino y el límite inferior del páramo. La segunda franja, denominada *páramos*, empieza en límite del complejo de páramos Los Nevados y va hasta el límite del PNN Los Nevados. Así mismo, contiene territorios transformados, páramo y parte de la zona baja del superpáramo. Por último, la franja altitudinal *PNN Los Nevados*, coincide con el segmento del parque y alcanza los 4960 m s. n. m. en la cima del glaciar Santa Isabel (Poleka Kasue en lengua Quimbaya). También, contiene superficie glaciar, periglacial y ecosistemas de superpáramo y páramo (en menor medida).

Figura 2. Modelo conceptual de la EMA.



Nota. Base de Datos Geográfica (GDB) RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

El análisis se realizó en su mayoría orientado a la resolución de preguntas de monitoreo, que básicamente indagan por relaciones entre variables, por ejemplo: ¿qué relaciones se encontraron entre las dinámicas de uso del suelo y el gradiente altitudinal? o ¿cuál es el impacto de la variabilidad climática sobre la oferta hídrica?

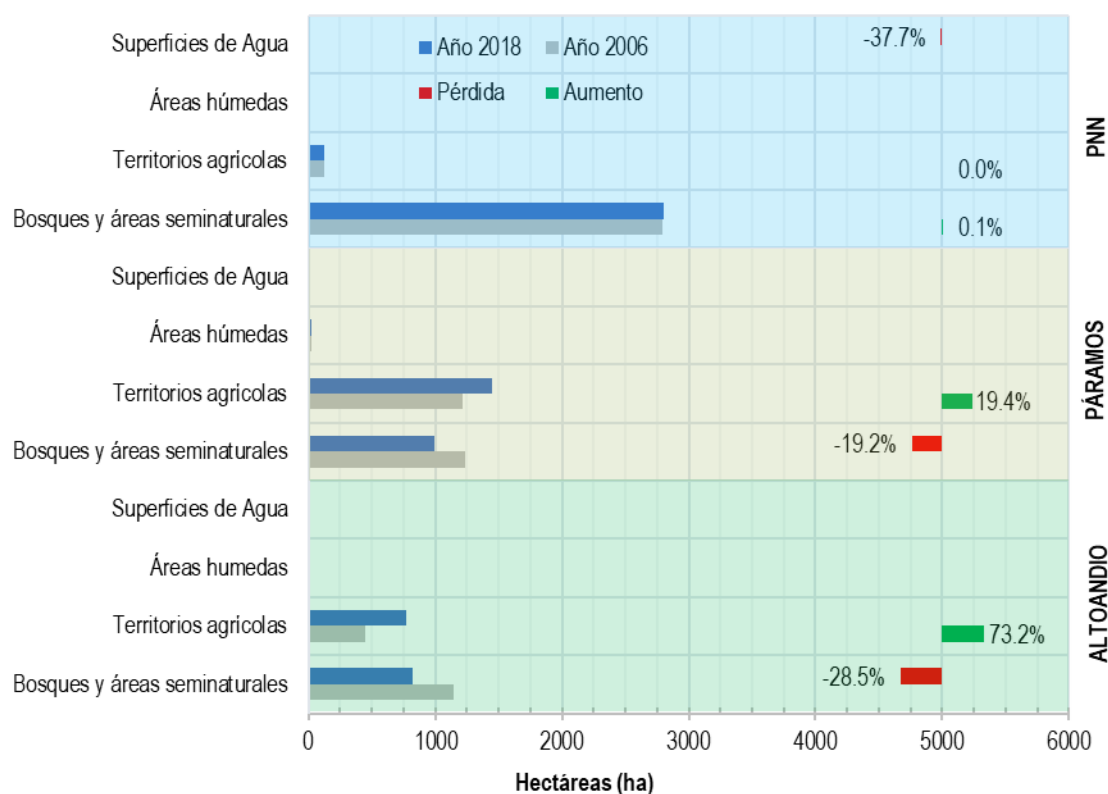
Resultados

Coberturas y uso del suelo

El análisis de usos y coberturas es de especial interés para el monitoreo integrado, ya que allí se conectan importantes variables respuesta con sus correspondientes factores de cambio de origen antrópico y climático. Entre las principales variables respuesta afectadas por los cambios de coberturas se tienen servicios ecosistémicos como la oferta hídrica, la regulación hídrica, el carbono almacenado y la biodiversidad. Por ello, la información de dinámicas de coberturas es clave para la valoración servicios ecosistémicos.

El análisis con el primer nivel de la clasificación Corine Land Cover (CLC N1) brinda un panorama rápido de los principales cambios (Figura 3). En este nivel se observó un aumento significativo en las coberturas de territorios agrícolas y una pérdida casi equivalente de bosques y áreas seminaturales. Al analizar los cambios con respecto a las franjas altitudinales, se encontró que, a mayor altitud, menores son los cambios en coberturas, lo que enfatiza el importante papel de la figura de protección del PNN Los Nevados (franja altitudinal más alta) como factor asociado a la conservación ambiental (Figura 3).

Figura 3. Dinámica de cambios en coberturas para el área de estudio, Nivel 1 CLC entre los años 2006-2018.



Nota. RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

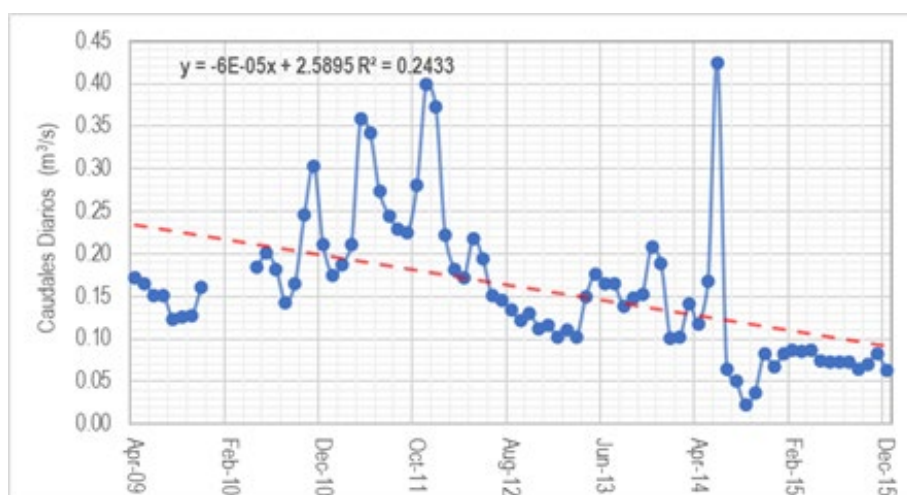
Cuando se analizaron en detalle estos cambios utilizando el N3 del CLC, se observó que la pérdida de bosques y áreas seminaturales es consecuencia, en mayor medida, de la deforestación de bosque abierto y su reemplazo por pastos limpios que se asocian a la actividad pecuaria. Por su parte, en el RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023), la cartografía de coberturas contribuyó a un análisis espacializado de otra información disponible a lo largo del gradiente altitudinal (p. ej., datos hidrometeorológicos y demográficos) y a la interpretación de datos y dinámicas sociales y económicas.

Clima e hidrología

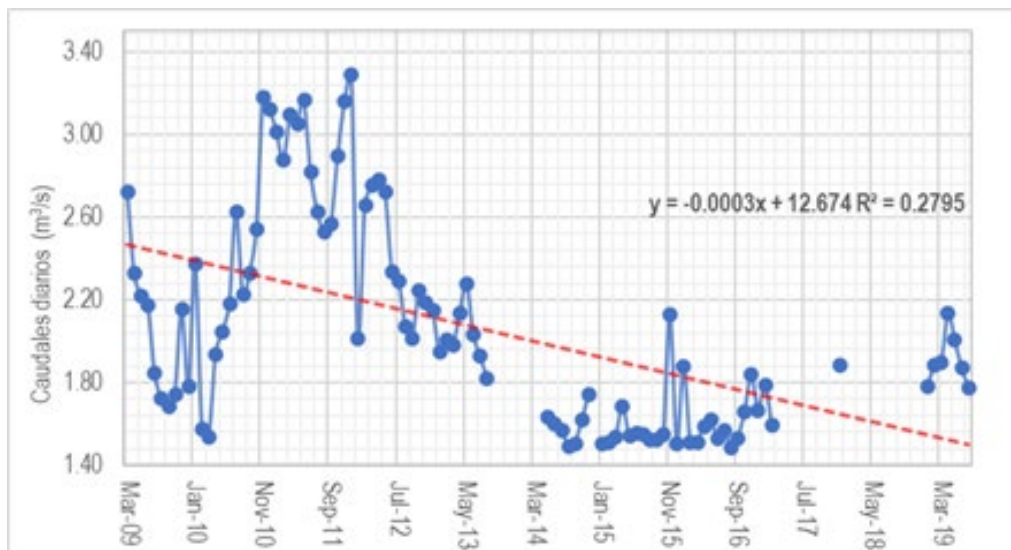
En el área de estudio se encontraron dos regímenes de precipitación. El primero fue bimodal típico de la zona Andina, con dos períodos secos que van de mitad de diciembre a marzo y de agosto a septiembre, y dos períodos húmedos de abril a julio y de octubre a mitad de diciembre. El segundo fue monomodal, encontrado en los registros de la estación Santa Isabel CEDIAC. En las partes más altas de la cuenca, las temperaturas medias pueden oscilar entre los 3,5 °C y los 6,2 °C con un incremento en los últimos once años que va de +0,2 a +0,8 °C dependiendo de la estación. La humedad relativa media es del 80 %, lo cual favorece el mantenimiento de caudales y la presencia de agua en la vegetación y el suelo.

Las ofertas hídricas presentaron reducciones generalizadas en la zona de estudio (Figura 4 y Figura 5), que porcentualmente fueron más pronunciadas en las franjas altitudinales de mayor transformación de coberturas de bosques y áreas seminaturales a pastos limpios, asociados a la actividad ganadera (reducción promedio de un 52 % en áreas transformadas frente a un 22 % en áreas conservadas). Así, la variabilidad climática asociada a la pasada secuencia Niña/Niño (Rabatel et al., 2018) y la ganadería se plantean como los principales factores de cambio observados en la oferta hídrica.

Figura 4. Oferta hídrica estación San Antonio 26157210 (2009-2015).



Nota. RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

Figura 5. Oferta hídrica estación Río Claro AUT 26157190 (2009-2019).

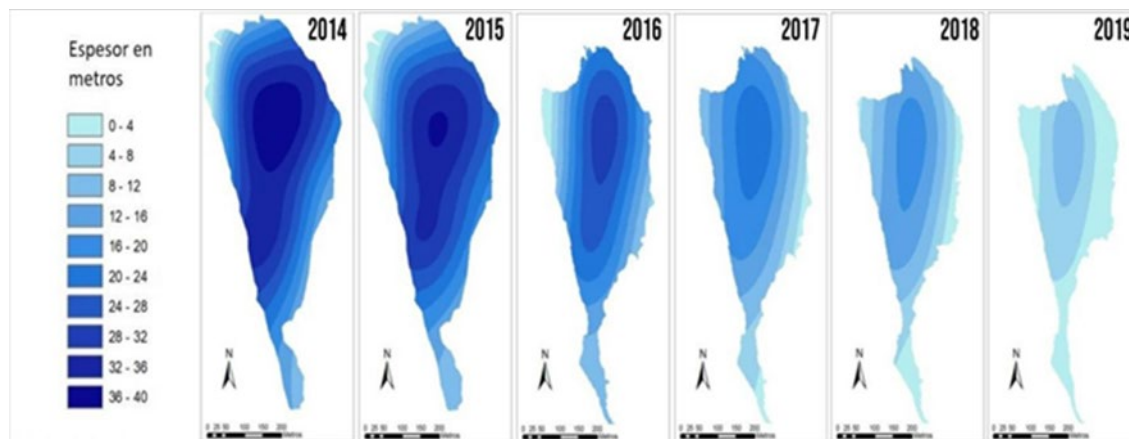
Nota. RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

La evapotranspiración, radiación solar, brillo solar y temperatura tienden a disminuir con la altitud, mientras que la humedad relativa tiende a aumentar respecto al gradiente altitudinal. Sin embargo, estos resultados también están asociados al método de interpolación utilizado para la generación de los mapas y la representatividad de las estaciones que se tomaron como fuentes de información.

Glaciares

El área de estudio de río Claro incluye una masa glaciar conocida como glaciar Conejeras, que pertenece al glaciar de Santa Isabel. El aporte de escorrentía superficial del Conejeras a la cuenca del río Claro es de 1 % en época húmeda y del 8 % en época seca. Esto se debe a que el comportamiento de los caudales procedentes de un sistema glaciar es inverso al régimen de precipitación, aumentando en las temporadas secas y disminuyendo en las húmedas por el descenso de la radiación incidente y la menor fusión de nieve asociada.

El mayor caudal proviene del deshielo derivado del último fenómeno climático extremo El Niño, entre 2015 y 2016, lo que apunta a la variabilidad climática como el principal factor de cambio en la dinámica glaciar. Después de este evento el aporte ha mostrado una tendencia a la disminución como respuesta a la fuerte reducción de área y volumen del glaciar Santa Isabel (Figura 6). Aunque el aporte del glaciar a la oferta hídrica parece bajo, resulta significativo, ya que la cobertura glaciar es apenas el 0,4 % del área de estudio (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

Figura 6. Extensión y espesor del glaciar, años 2014 al 2019.

Nota. Informe técnico estado glaciar Santa Isabel (IDEAM & Minambiente, 2020).

Respecto a la dinámica propia del glaciar Santa Isabel, durante el periodo 2006 a 2022, el balance acumulado fue de -56,3 m equivalentes de agua, un valor muy alto para un glaciar relativamente pequeño. La reducción del espesor del hielo pasó de 52 m en su parte más profunda, en 2014, a tan solo 5 m durante 2022. A lo largo de la década 2010 a 2020, su área se redujo en 77 % (1,46 km²), pasando de 1,91 km² a 0,45 km² (IDEAM, 2023). De continuar este rápido derretimiento, su extinción podría ocurrir en los próximos 10 años.

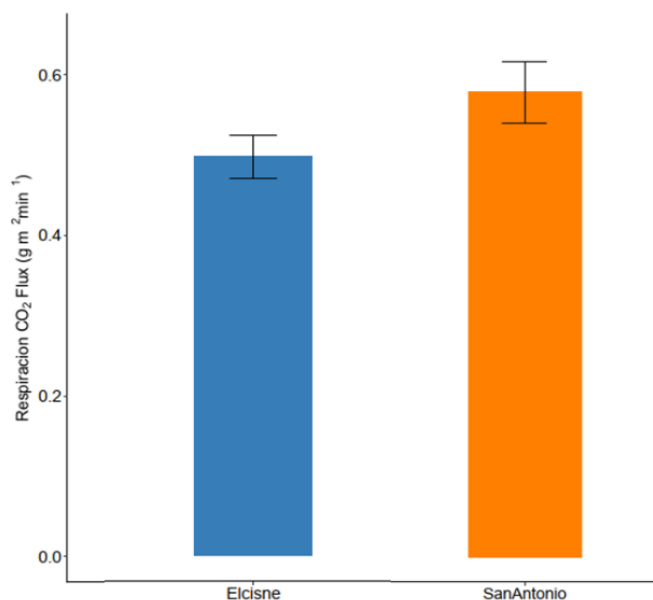
Carbono y biomasa

Los datos disponibles permiten identificar dinámicas de los procesos de acumulación de carbono en los diferentes tipos de vegetación (arbustiva, de pajonal y leñosa), sus cambios a lo largo del gradiente altitudinal y los impactos de las actividades antrópicas. Los estudios realizados (IGAC & Instituto Humboldt, 2018) demuestran que los ecosistemas paramunos, en efecto, cumplen una importante función como sumideros de carbono.

En términos generales, la cantidad de carbono almacenado en el área de estudio presenta una alta variabilidad espacial y temporal, con una tendencia a la reducción durante la última década (2012-2020), principalmente en los suelos (con pérdidas que alcanzan las 25 ton/ha), mientras que las tendencias son más variables espacialmente en el caso del carbono en necromasa. El patrón de reducción del carbono en suelos se agudiza en las franjas altitudinales de menor elevación, caracterizadas por una mayor intervención antrópica y por procesos de deforestación. La deforestación de la última década y el aumento de pastos limpios implican una reducción en el almacenamiento de carbono en la biomasa y en los suelos a esta escala, aunque no se tienen datos a escala de paisajes de la variación del contenido de carbono total en la cuenca.

Por su parte, los resultados de flujos de CO₂ estudiados en dos humedales localizados en la zona de influencia del PNN Los Nevados (El Cisne 4350 m s. n. m., San Antonio 3900 m s. n. m.) muestran mayores emisiones para el sitio de menor altitud y mayor grado de intervención antrópica (Figura 7).

Figura 7. Datos de flujo de CO₂ (respiración) de los humedales monitoreados en el ADE en el año 2020.



Nota. Angulo-Pérez, et al., 2020). 2. Registros de colecciones del Instituto Humboldt y el Instituto de Ciencias Naturales (WCS, 2019). 3. Mojica et al., 2009). 4. Información secundaria.

Biodiversidad

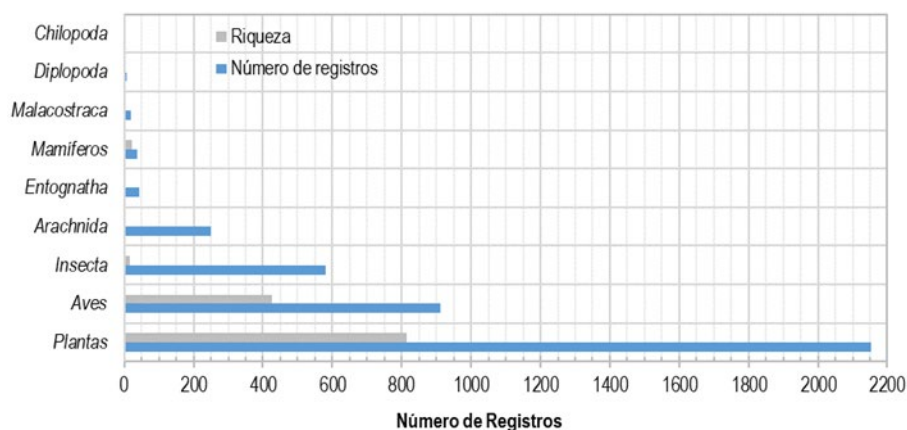
En este componente se encontraron varias referencias para ecosistemas de páramo asociadas a investigaciones realizadas al interior PNN Los Nevados y, por el contrario, muy pocos estudios realizados en las franjas altitudinales inferiores. Adicionalmente, ninguno de los estudios a los que tuvimos acceso hace parte de un programa de monitoreo sostenido en el tiempo, por lo que no fue posible identificar dinámicas o impactos de factores de cambio sobre la biodiversidad con base en los datos disponibles.

Las plantas y aves presentaron la mayor cantidad de registros biológicos, 2154 y 910 respectivamente; los insectos y arácnidos presentaron 582 y 249 registros, y los demás grupos taxonómicos contaron con menos de 50 registros cada uno.

La mayor riqueza de especies se presentó en las plantas vasculares con 815 especies (Figura 8). En cuanto a la flora, la familia con mayor número de registros y riqueza de especies que se encuentran registradas para el área de estudio es Asteraceae, debido a que las investigaciones se han concentrado en áreas de páramo. Entre las especies de plantas más recurrentes en los estudios se encuentran el frailejón (*Espeletia hartwegiana*), el género *Gynoxys* sp., la cortadera (*Cortaderia nitida*), la tagua (*Gaiadendron punctatum*),

el romero de páramo (*Diplostephium schultzei*), el rodamontes (*Escallonia myrtilloides*) y gramíneas en macolla (p. ej., *Calamagrostis effusa*).

Figura 8. Número de registros y riqueza por cada taxón registrado en el ADE.



Nota. RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

El segundo grupo con mayor riqueza fue el de las aves, para las que se han registrado 426 especies agrupadas en 21 órdenes, 55 familias y 268 géneros. Para los mamíferos se registraron 6 órdenes, 10 familias y 21 especies. De acuerdo con la información disponible, el orden con mayor número de registros y mayor riqueza de especies de mamíferos es *Chiroptera* (murciélagos), los cuales sumaron 21 registros. Por su parte, el grupo de artrópodos refleja un bajo número de registros y de riqueza de especies. Esto se relaciona, en particular, con el escaso número de investigaciones dirigidas a su estudio.

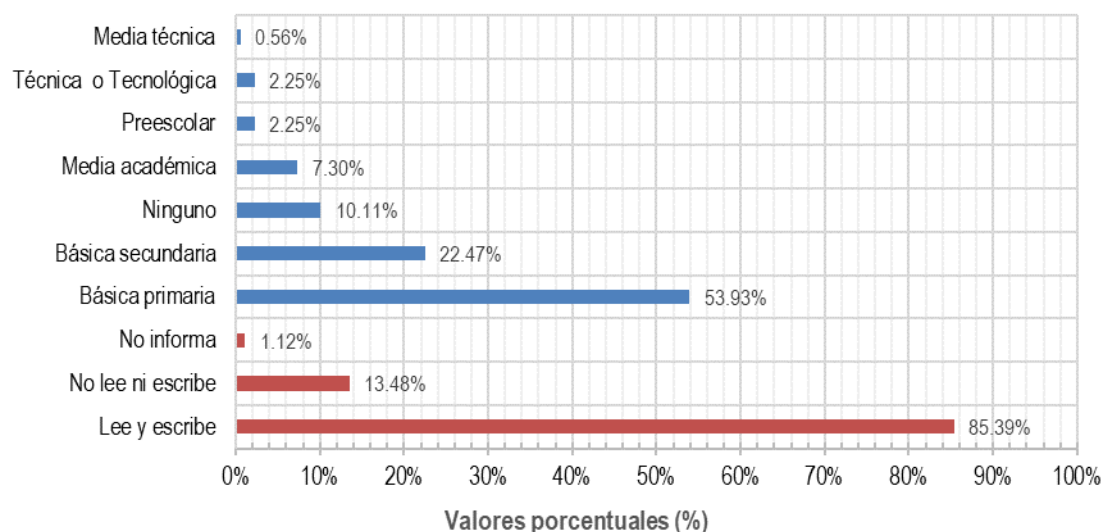
Aspectos socioeconómicos

El monitoreo de estos aspectos es una de las innovaciones más importantes que trae consigo la EMA como propuesta marco de monitoreo de un ecosistema. Esta inclusión puede, en el mediano o largo plazo, consolidar formas novedosas de acercarse al monitoreo integral al incorporar procesos sociales que se relacionan con el marco ecosistémico, más allá de detallar efectos adversos sobre la biodiversidad. Entre estas otras dimensiones de la acción social en el territorio, podemos mencionar procesos colectivos de protección, prácticas culturales de cuidado, manejo de conflictos socioambientales, entre otros.

La información disponible indica una alta vulnerabilidad social en la zona (Friend & Olvera Ycaza, 2018), vinculada con la figura de “agregados” (forma típica de tenencia de la tierra en el área de estudio) y con limitaciones en variables asociadas a la pobreza multidimensional, como dificultades para acceso a la salud o a servicios públicos (saneamiento básico) y niveles de escolaridad medio-bajos (Figura 9). En cuanto a la dinámica poblacional, se observó una reducción en el número de habitantes que es consistente con la reducción de las actividades agrícolas, reemplazadas por actividades ganaderas, y que se manifiesta también en los cierres de la junta de acción comunal de la vereda Potosí (una de las dos veredas del área

de estudio) y de la escuela veredal, establecimientos fundamentales de la sociedad en la ruralidad colombiana.

Figura 9. Nivel de escolaridad.



Nota. RED río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

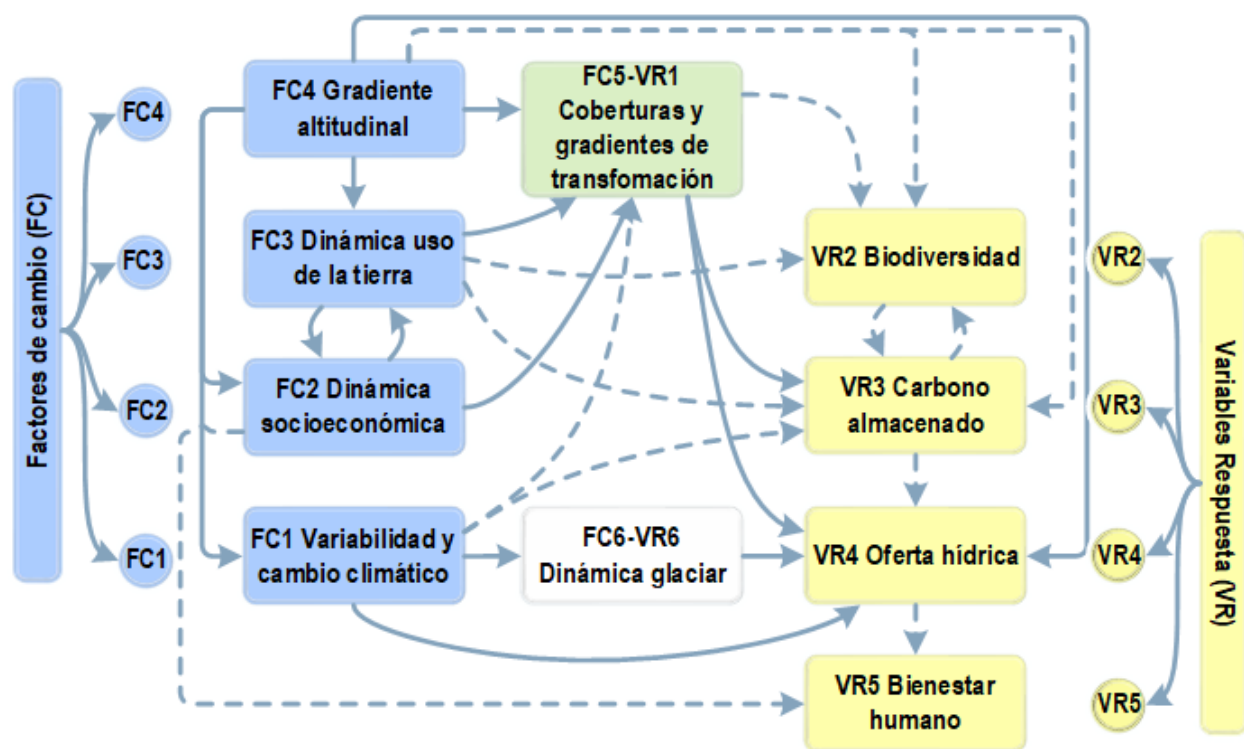
Este contexto supone un reto metodológico para construir procesos de gobernanza territorial con incidencia directa de comunidades locales, así como procesos de monitoreo comunitario del territorio, tal y como se requiere desde el marco normativo colombiano para el manejo de los páramos, establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ley 1930 de 2018 y Resolución 886 de 2018).

Otros hallazgos relevantes para la zona son el patrón de ocupación del territorio y la propiedad de la tierra, caracterizados por predios de gran tamaño dedicados a la ganadería extensiva (lo que implica a su vez una densidad poblacional baja y alta dispersión) (Instituto Humboldt & Fundación Ecológica Reserva las Mellizas, 2015) y presencia de procesos de gobernanza regionales que incluyen la cuenca alta de río Claro, donde eventualmente se pueden involucrar algunos de sus predios, propietarios y habitantes (CARDER & PANGAEA, 2020).

Discusión

La contribución fundamental de un reporte RED como el propuesto en el enfoque conceptual y metodológico de la EMA es generar un análisis integrado de diferentes dimensiones temáticas de monitoreo ambiental y social. La Figura 10 presenta un diagrama relacional simplificado del análisis integrado de variables propuesto para el RED en el caso de río Claro, donde se ilustran algunas de las relaciones básicas entre factores de cambio y variables respuesta.

Figura 10. Diagrama simplificado de relaciones entre los principales factores de cambio y variables respuesta.



Nota. Las flechas continuas representan las relaciones que pudieron ser exploradas dada la disponibilidad de información en el RED río Claro. Las flechas discontinuas son relaciones abordadas de forma preliminar o por abordar en futuros reportes. Fundación IPC (2024).

El diagrama muestra, en primer lugar, variables como las coberturas del suelo y la dinámica de los glaciares, que pueden actuar como variables respuesta (aquellas que responden a las dinámicas socioeconómicas y climáticas), pero a su vez son en sí mismas factores de cambio para otras variables (como la oferta hídrica o el carbono almacenado en la vegetación y el suelo).

Del conjunto de variables para las que se encontró información en el RED río Claro, se identificaron dos grandes grupos en función de su temporalidad: 1) variables multitemporales y 2) variables con un solo momento de medición. Con las primeras fue posible establecer dinámicas de cambio, como en caso de las coberturas de la tierra, la oferta hídrica, el carbono en suelos y la población. Con las segundas solo se logró identificar estados y realizar análisis espaciales, como en el caso de algunos indicadores de biodiversidad.

En el análisis integrado de variables, el gradiente altitudinal coincidió con la variación espacial de múltiples variables, confirmando su importancia explicativa según lo propuesto en el marco conceptual de la EMA (Llambí et al., 2019). Esto fue evidente en variables ambientales como la temperatura, humedad relativa, brillo solar y evapotranspiración. La influencia del gradiente de elevación también se expresó en variables

de la dimensión social/antrópica, en las que a mayor altitud se observa un menor desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias.

La cobertura del suelo se configuró como una variable central para el análisis integrado de dinámicas de cambio, pues a través de ella se relacionaron distintas variables y factores de cambio (Figura 10). Se observaron varias relaciones que vale la pena resaltar, como: 1) la relación entre la dinámica de aumento en las temperaturas (FC1) y la dinámica de cambio del área glaciaria (VR6); 2) la relación entre la dinámica de reducción del área de bosques (FC5) y los cambios en la oferta hídrica en las franjas altitudinales bajas (VR4); 3) la relación entre actividades productivas como el área dedicada a la ganadería (FC3) y los cambios en coberturas en las franjas inferiores, incluyendo la reducción del área agrícola y de bosques (VR1), y 4) la relación entre la deforestación (FC5) y la reducción de carbono almacenado (VR3), que es evidente a partir de las tendencias de cambio observadas, aunque no se haya explorado cuantitativamente.

Los principales factores de cambio de este ejercicio (porque pudieron ser asociados con muchas otras variables analizadas) fueron el clima y las actividades pecuarias. La ganadería ha sido identificada como la principal presión antrópica en el programa de monitoreo del PNN Los Nevados (registros de campo sistematizados y georreferenciados en SICO SMART) y su impacto fue evidente en los cambios de coberturas de bosques naturales a pastos limpios dentro de las franjas media y baja del área de estudio.

Los efectos climáticos se evidenciaron más claramente en la franja alta, allí se expresan en la reducción del área y espesor del glaciar (IDEAM & Minambiente, 2020). En términos socioeconómicos, los impactos de la ganadería de bovinos se asociaron con dinámicas de reducción de las actividades agrícolas que ayudan a explicar el proceso de disminución de la población y debilitamiento del capital social/institucional observado en la zona en la última década.

El efecto combinado de los dos principales factores de cambio puede relacionarse a su vez con los cambios en la oferta hídrica; se presentaron reducciones asociadas a la alternancia de fenómenos climáticos en años húmedos (La Niña) con años secos (El Niño), mucho más drásticas en las franjas intermedia y baja, donde hubo mayor deforestación. La ausencia de vegetación puede limitar la captura de precipitación horizontal, aumentar las tasas de evaporación y reducir la materia orgánica de suelos sumada a su consecuente capacidad almacenamiento de agua (Tobón, 2022); en conjunto, estos tres factores podrían explicar cómo la deforestación reforzó la reducción de la oferta hídrica en las zonas de mayor intervención pecuaria. El factor institucional, en términos de las políticas ambientales del Sistema Nacional de Parques Naturales, también parece tener un importante impacto en la franja alta del área de estudio, en la que se tuvieron las tasas más bajas de deforestación y se concentraron la mayor cantidad de los esfuerzos de monitoreo.

Ya que, en su esencia, la EMA es una estrategia de integración de iniciativas de monitoreo, el alcance pleno de sus objetivos depende de la disponibilidad de datos. En el RED río Claro las limitaciones en la disponibilidad de información se deben a: 1) información inexistente en el caso de algunas variables sociales; 2) información existente, pero a la que no se pudo acceder, como algunos estudios de biodiversidad; 3) información con limitaciones espaciales, como estudios realizados únicamente en la

franja del PNN Los Nevados (p. ej., inventarios de flora y fauna); 4) información con limitaciones temporales y datos puntuales que no obedecen a una iniciativa de monitoreo periódico; 5) información con baja frecuencia de monitoreo, como en el caso de coberturas de la tierra; 6) información con discontinuidades, como en algunas variables climáticas, y por último 7) información en rangos limitados de tiempo que no permiten la observación a largo plazo (p. ej., datos de caudales). Siendo esta una de las zonas con mayor intensidad de esfuerzos de monitoreo en las montañas de Colombia (Llambí et al., 2019), estas dificultades nos indican los grandes desafíos que debemos enfrentar para consolidar una visión integrada de las dinámicas territoriales en otras regiones que han recibido menos atención en el marco de programas de monitoreo a largo plazo, en Colombia y otras regiones de los Andes (Carilla et al., 2024).

Las limitaciones de información distribuida espacialmente a lo largo del gradiente de elevación y la imposibilidad de acceder a información existente, pero aún sin publicar (p. ej., de monitoreo de la dinámica de la vegetación), obstaculiza en particular la integración de las escalas de parcelas y de paisaje, en mayor medida para variables asociadas al carbono y la biodiversidad, y por ende, la estimación de sus correspondientes servicios ecosistémicos. A su vez, a escala nacional los reportes de estado y tendencia aún no cuentan con una base de datos cartográfica estandarizada para facilitar la integración de la información proveniente de diferentes sitios de monitoreo.

Los procesos de transformación antrópicos han sido muy importantes en el análisis integrado de ecosistemas, por lo que probablemente sus impactos superan con creces otro tipo de factores, como los climáticos, enmascarando posibles procesos de cambio en la composición y estructura de la vegetación en escenarios de cambio climático (Cuesta et al., 2023). En el caso de coberturas, la brecha de más de diez años entre los mapas parece bastante amplia, lo que puede condicionar su utilidad para orientar la toma de decisiones oportunas y hacer frente a los cambios marcados que se observaron en las franjas media y baja. Por otra parte, la discontinuidad y falta de profundidad temporal de los registros de series de variables climáticas resultan limitantes a la hora de realizar análisis de cambio climático, y complican la implementación de modelos hidrológicos y de sedimentos valiosos para la valoración de servicios ecosistémicos.

Finalmente, en la temática social, la baja densidad poblacional, los patrones de ocupación del territorio (Instituto Humboldt & Fundación Ecológica Reserva las Mellizas, 2015) y la pérdida de espacios de cohesión de la comunidad dificultan su integración a los procesos de monitoreo y gestión territorial participativa, en el contexto de la EMA.

Estas fortalezas y debilidades deben ser consideradas para el desarrollo de nuevos análisis RED en el área de río Claro que mejoren la integración institucional y social, permitan acceso a toda la información existente, cierren vacíos de información y alcancen objetivos más complejos asociados al análisis integrado de ecosistemas, la integración de escalas y la valoración de servicios ecosistémicos. En este último aspecto ya se dio un paso importante mediante la implementación de un modelo hidrológico distribuido para el área de río Claro, con el que se estimó el impacto de los cambios de coberturas en la oferta hídrica. Los resultados preliminares se encuentran publicados en el documento *Lineamientos de Monitoreo Hidroclimático a Escala de Paisaje en Socio Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia EMA-*

LHC (Castaño et al., 2024). Por otro lado, el trabajo del equipo del Observatorio Poleka Kasue en la zona (Ruiz-Carrascal, 2016) y la incorporación de la cuenca del río Claro como un observatorio nodal de la Red de Observatorios Socioecológicos de los Andes (que incluye sitios de trabajo desde Venezuela y Colombia hasta Argentina y Chile) ofrecen la oportunidad de continuar consolidando estos procesos de monitoreo con una visión integral interdisciplinaria (Carilla et al., 2024).

Con base en estas consideraciones, a continuación se sintetizan las principales recomendaciones producto de la reflexión realizada en el RED río Claro en el marco de la EMA.

- Avanzar en la formalización de la red institucional de la EMA en Colombia para el desarrollo de los convenios con la institucionalidad del orden nacional, la gestión de nuevos ejercicios de monitoreo integrado a escala regional y el sostenimiento de los ejercicios ya iniciados.
- Realizar convenios para la normalización/estandarización de los procedimientos dirigidos a la obtención de información socioambiental de base para la elaboración de reportes RED. Los actores más relevantes del orden nacional son: IDEAM (monitoreo climático, carbono y flora), DANE (información sociodemográfica y económica a escala de sectores censales), ANLA (licencias ambientales en las áreas de estudio) e IGAC (información predial histórica para análisis de dinámicas en la tenencia de la tierra). La mayor restricción a nivel institucional se encontró en el acceso a la información del Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales SISBEN.
- Tener en cuenta a los actores institucionales clave para consolidar los procesos de monitoreo de largo plazo en la cuenca del río Claro, a nivel regional incluyen: el Observatorio Poleka Kasue y su trabajo en el marco de la red ROSA (monitoreo biodiversidad y variables climáticas, uso del suelo y dinámicas sociales), Corpocaldas (coberturas, licencias ambientales), Comisión Conjunta del Complejo de Páramo de Los Nevados (integración de escalas), Fundación VivoCuenca (servicios ecosistémicos), e instituciones de educación superior (nuevas iniciativas de monitoreo periódico, análisis y procesamiento de información).
- Fortalecer el proceso de integración de la escala de parcelas con las escalas superiores (paisaje y complejo de páramos) a partir de la sistematización y análisis integrado de las parcelas de monitoreo del IDEAM y del Observatorio Poleka Kasue. Además, promover un monitoreo periódico con cobertura completa del gradiente altitudinal en variables asociadas a: 1) carbono aéreo y en suelos, 2) la biodiversidad (abundancia de especies, grupos funcionales, etc.) y 3) variables ecohidrológicas (precipitación horizontal, evapotranspiración, etc.) que permitirían el refinamiento de modelos hidrológicos distribuidos.
- Aumentar la frecuencia en la actualización de los mapas de usos y coberturas del suelo, al menos a cada cinco años. Asimismo, incluir formas de clasificación espacial del territorio por tipos de ecosistemas en la actualización periódica de información cartográfica con el fin de facilitar su análisis integrado.
- Recuperar las estaciones hidrometeorológicas del área de estudio que presentan problemas de discontinuidad en las medidas.

- Consolidar una base de datos cartográfica (GDB), a nivel nacional, regional y de paisajes, que facilite el análisis integrado de información a diferentes escalas. Una opción atractiva es la propuesta por la ANLA (ANLA, 2016) por el amplio uso institucional a nivel nacional.
- Promover un monitoreo que permita hacer seguimiento al conjunto amplio de las relaciones cultura-ecosistema en la alta montaña. Es prioritario ampliar la mirada de la dimensión social para profundizar en el entendimiento de la relación cultura-ecosistema, más allá de la concepción de la sociedad como un factor o motor de cambio del ecosistema. Esa mirada compleja debe apoyarse en un abordaje metodológico que acerque a los propietarios, comunidades locales y a otros actores sociales a la definición de preguntas de investigación, construcción de metodologías para la gestión de la información, levantamiento y análisis de datos y comunicación de resultados, todo lo anterior para favorecer la apropiación social del conocimiento generado en la EMA (Carilla et al., 2024).
- Implementar una propuesta de comunicación comunitaria en torno a los resultados del ejercicio que permita difundir la información hacia distintos segmentos de la población (especialmente entre las comunidades locales) a partir del uso de herramientas, medios y lenguajes pertinentes con cada grupo identificado. El PMIP-AM (IDEAM, 2022b) propone el diseño y puesta en funcionamiento de una plataforma web para la interacción, de manera permanente, entre redes y procesos ubicados en diferentes lugares del país para el alojamiento e intercambio de datos y para la comunicación efectiva de resultados.

Conclusiones

La implementación del RED río Claro ha constituido un laboratorio para la exploración de las fortalezas y debilidades que enfrentamos a la hora de implementar el enfoque para el monitoreo integral a largo plazo propuesto en la EMA, en una zona emblemática de Colombia, dada la gran cantidad de iniciativas de monitoreo existentes.

En este contexto, el monitoreo multitemporal de coberturas mostró ser la base para los objetivos más complejos de la EMA, como el análisis integrado de dinámicas de cambio, la integración de escalas y la valoración de servicios ecosistémicos, por lo que es clave su inclusión para cualquier otro RED que se plantee en el territorio nacional y para la consolidación de observatorios de monitoreo a largo plazo en los Andes (p. ej., en el marco de la iniciativa ROSA) (Carilla et al., 2024).

La presencia de estaciones de monitoreo de caudales también debe ser una condición prioritaria, dada la alta valoración de la oferta hídrica como servicio ecosistémico y la sensibilidad que puede mostrar frente a distintos tipos de variables (abióticas, bióticas y antrópicas) que resaltan las ventajas del análisis integrado. Así, el agua puede funcionar como un eje articulador de integración a lo largo del gradiente ambiental y de intensidad de transformación en el territorio.

Las reflexiones de este primer ejercicio reafirmaron la importancia del monitoreo de parcelas distribuidas a lo largo del gradiente altitudinal como el elemento clave para la integración con la escala de paisaje propuesta en el marco de la EMA (Llambí et al., 2019), y perfilaron a los recientemente delimitados

complejos de páramos como beneficiarios naturales de los resultados de reportes RED, debido a su utilidad como fuentes de información primaria y de experiencias para la formulación y actualización de sus instrumentos de planificación socioambiental.

El ejercicio de síntesis de la información generada a través de procesos de monitoreo a largo plazo muestra claramente su valor para documentar los impactos del clima y de cambios en el uso de la tierra, incluyendo procesos de deforestación. Esta información tiene la capacidad de convertirse en la columna vertebral de la toma de decisiones acordada en escenarios de gobernanza territorial, elementos que son estructurantes principales del actual marco normativo de páramos y son exigidos de manera cada vez más insistente por parte de los grupos comunitarios.

La potencia explicativa del análisis integrado de variables y del enfoque socioecológico sintetizado en las secciones precedentes sugiere que la metodología de la EMA, implementada en el RED río Claro, puede hacer un aporte importante a la comprensión global de las dinámicas de los socioecosistemas de alta montaña y ser de gran utilidad para el diseño de políticas de gestión orientadas hacia los factores de cambio más relevantes y con mayor oportunidad de intervención. Estos deben ser prioritarios en las agendas de las autoridades y organizaciones encargadas de la protección y gestión ambiental, así como entre las comunidades locales.

A su vez, el ejercicio del RED río Claro brinda información que puede contribuir a la planificación territorial (p. ej., para el Plan de Manejo del complejo de Páramos Los Nevados y para el desarrollo de la Ley de Páramos); a la adaptación al cambio climático (a partir de la síntesis de información sobre los cambios en las temperaturas, oferta hídrica y pérdida del glaciar); a orientar procesos de restauración ecológica en la alta montaña (especialmente en la franja del bosque altoandino), y a fortalecer procesos de gobernanza territorial liderados por asociaciones de productores y acueductos comunitarios, entre otro tipo de organizaciones de base. En ese sentido, el ejercicio del RED río Claro también evidencia el desafío abierto de promover e implementar enfoques para el monitoreo participativo.

Agradecimientos

Agradecemos los importantes aportes realizados por el revisor de este trabajo. A su vez, queremos agradecer al programa Adaptación en las Alturas (COSUDE), coordinado por CONDESAN en los Andes, por el apoyo financiero para la implementación del RED río Claro. A María Teresa Becerra y Manuel Peralvo por sus aportes conceptuales durante la primera etapa de desarrollo del proceso de consolidación de la EMA. A Corpocaldas, al CEDIAC, al Obsevatorio Poleka Kasue, al PNN Los Nevados, al Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, al Fondo del Agua VivoCuenca y al DANE por la información suministrada.

Referencias

Adler, C., Palazzi, E., Kulonen, A., Balsiger, J., Colangeli, G., Cripe, D., Forsythe, N., Goss-Durant, G., Guigoz, Y., Krauer, J., Payne, D., Pepin, N., Peralvo, M., Romero, J., Sayre, R., Shahgedanova, M., Weingartner,

- R., & Zebisch, M. (2018). Monitoring Mountains in a Changing World: New Horizons for the Global Network for Observations and Information on Mountain Environments (GEO-GNOME). *Mountain Research and Development*, 38(3), 265–269. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-8-00065.1>
- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V., & Prakash, A. (2022). *Cross-Chapter Paper 5: Mountains. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2273–2318). Cambridge University Press. <https://doi.org/doi:10.1017/9781009325844.022>
- Aide, T. M., Grau, H. R., Graesser, J., Andrade-Nuñez, M. J., Aráoz, E., Barros, A. P., Campos-Cerqueira, M., Chacon-Moreno, E., Cuesta, F., Espinoza, R., Peralvo, M., Polk, M. H., Rueda, X., Sanchez, A., Young, K. R., Zarbá, L., & Zimmerer, K. S. (2019). Woody vegetation dynamics in the tropical and subtropical Andes from 2001 to 2014: Satellite image interpretation and expert validation. *Global Change Biology*, 25(6), 2112–2126. <https://doi.org/10.1111/gcb.14618>
- ANLA. (2016). *Guía para el diligenciamiento y presentación del modelo de datos geográficos*. ANLA.
- CARDER, & PANGAEA. (2020). *Caracterización de actores Complejo de Páramos los Nevados*. Producto 21: Contrato 337.
- Carilla, J., Aráoz, E., Acosta, O. O., Malizia, A., Malizia, M., Jimenez, Y., Peralvo, M., Garces, A., Lasso, G., & Llambí, L. D. (2023). Long-Term Environmental and Social Monitoring in the Andes: State of the Art, Knowledge Gaps, and Priorities for an Integrated Agenda. *Mountain Research and Development*, 43(2), A1. <https://doi.org/10.1659/mrd.2022.00018>
- Carilla, J., Grau, R., Acosta, O. O., Malizia, A., Ceballos, S., Llambí, L. D., Piquer-Rodríguez, M., Zarbá, L., Flores, S., Cuesta, F., Luna, T. O., Ferreira, W., Tovar, C., Jimenez, Y., Hurtado-M, A. B., Nagy, L., Buscardo, E., Wallem, P., Breuer, P., ... Aráoz, E. (2024). ROSA: An Andean Network of Social–Ecological Observatories. *Mountain Research and Development*, 44(4), A1-A10. <https://doi.org/10.1659/mrd.2023.00048>
- Castaño, J. A., Aristizabal, V. M., Llambí, L. D., & Vélez, J. J. (2024). *Lineamientos de monitoreo hidroclimático a escala de paisajes en socio-ecosistemas de alta montaña en Colombia (EMA-LHC)* (p. 113). Programa Adaptación en las Alturas – Andes. CONDESAN-COSUDE.

<https://condesan.org/recursos/lineamientos-de-monitoreo-hidroclimatico-a-escala-de-paisaje-en-socioecosistemas-de-alta-montana-en-colombia-ema-lhc/>

Castillo-Villanueva, L., & Velázquez-Torres, D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socioecológicos y resiliencia. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 17(2), 11-32. Consultado de <https://quivera.uaemex.mx/article/view/9811>

Correa Ayram, C. A., Etter, A., Díaz-Timoté, J., Rodríguez Buriticá, S., Ramírez, W., & Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117, 106630. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>

Cuesta, F., Carilla, J., Llambí, L. D., Muriel, P., Lencinas, M. V., Meneses, R. I., Feeley, K. J., Pauli, H., Aguirre, N., Beck, S., Bernardi, A., Cuello, S., Duchicela, S. A., Eguiguren, P., Gamez, L. E., Halloy, S., Hudson, L., Jaramillo, R., Peri, P. L., ... Tovar, C. (2023). Compositional shifts of alpine plant communities across the high Andes. *Global Ecology and Biogeography*, 32(9), 1591–1606. <https://doi.org/10.1111/geb.13721>

Cuesta, F., Muriel, P., Llambí, L. D., Halloy, S., Aguirre, N., Beck, S., Carilla, J., Meneses, R. I., Cuello, S., Grau, A., Gámez, L. E., Irazábal, J., Jácome, J., Jaramillo, R., Ramírez, L., Samaniego, N., Suárez-Duque, D., Thompson, N., Tupayachi, A., Gosling, W. D. (2017). Latitudinal and altitudinal patterns of plant community diversity on mountain summits across the tropical Andes. *Ecography*, 40(12), 1381–1394. <https://doi.org/10.1111/ecog.02567>

Friend M., F., & Olvera Ycaza, P. (2018). *Análisis de vulnerabilidad socioeconómica y natural de la cuenca del río Chinchiná*. CIIFEN. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00W6J4.pdf

Hurtado, A. B., Salinas, V., Garzón, F., Alcázar, C., Nieto, J., García, D., González, R., & Norden, N. (2020). *Identificación de plataformas regionales de monitoreo de alta montaña en Colombia*. Instituto Humboldt. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35655>

IDEAM. (2020). *Informe Análisis de Flujo de CO₂, eficiencia de ecosistema, radiación par y flujo de metano en humedales* (Contrato 193 2020: Protocolo de Monitoreo de Ciclo del Carbono en Alta Montaña) (p. 36). IDEAM; Pontificia Universidad Javeriana.

- IDEAM. (2022a). *Primer Reporte Nacional sobre el Estado y Tendencia de la Alta Montaña en Colombia*. (p. 174). IDEAM.
- IDEAM. (2022b). *Protocolo de Monitoreo Integrado y Participativo de la Alta Montaña*. IDEAM.
- IDEAM. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. IDEAM.
- IDEAM, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, & CONDESAN. (2018). *Propuesta: Estrategia para Monitoreo Integrado de los Ecosistemas de Alta Montaña de Colombia* (p. 52).
- IDEAM, & MINAMBIENTE. (2020). *Informe técnico del estado del glaciar Santa Isabel, Sector Conejeras*. (pp. 1–23). IDEAM.
- IGAC, & Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2018). *Identificación de la hoja de ruta y procedimientos para la estimación del contenido de carbono orgánico en suelos de páramos y humedales* (p. 149). Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/34980>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, & Fundación Ecológica Reserva las Mellizas. (2015). *Caracterización sociocultural y económica de los complejos de páramos Los Nevados y Chilí- Barragán*. (Convenio especial de Cooperación No. 14-13-014-031).
- Llambí, L. D. (2018). *Memorias del taller: Hacia la consolidación de una estrategia de monitoreo integrado de ecosistemas de alta montaña en Colombia*.
- Llambí, L. D., Becerra, M. T., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M., & Flores, L. J. (2019). Monitoring Biodiversity and Ecosystem Services in Colombia's High Andean Ecosystems: Toward an Integrated Strategy. *Mountain Research and Development*, 39(3), A8–A20. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00020.1>
- Llambí, L. D., Becerra, M. T., Peralvo, M., Baruffol, M., & Díaz, L. J. (2019). Construcción de una Estrategia para el Monitoreo Integrado de los Ecosistemas de Alta Montaña en Colombia. *Biodiversidad En La Práctica*, 4(1), 150–172.
- MADS. (2018). Ley 1930 de 2018: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

- Malizia, A., Blundo, C., Carilla, J., Osinaga Acosta, O., Cuesta, F., Duque, A., Aguirre, N., Aguirre, Z., Ataroff, M., Baez, S., Calderón-Loor, M., Cayola, L., Cayuela, L., Ceballos, S., Cedillo, H., Farfán Ríos, W., Feeley, K. J., Fuentes, A. F., Gámez Álvarez, L. E., ... Young, K. R. (2020). Elevation and latitude drives structure and tree species composition in Andean forests: Results from a large-scale plot network. *PLOS ONE*, 15(4), e0231553. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231553>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., Antiporta, J., Acosta, L., Bardales, J. D., Célleri, R., Crespo, P., Fuentes, P., Gil-Ríos, J., Gualpa, M., Llerena, C., Olaya, D., Pardo, P., Rojas, G., Villacís, M., Villazón, M., Viñas, P., & De Bièvre, B. (2018). High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. *Scientific Data*, 5(1), 180080. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.80>
- Pauli, H., & Halloy, S. R. P. (2019). *High Mountain Ecosystems Under Climate Change*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.764>
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., ... Group, M. R. I. E. D. W. W. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- 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>
- Rahbek, C., Borregaard, M. K., Colwell, R. K., Dalsgaard, B., Holt, B. G., Morueta-Holme, N., Nogues-Bravo, D., Whittaker, R. J., & Fjeldsø, J. (2019). Humboldt's enigma: What causes global patterns of mountain biodiversity? *Science*, 365(6458), 1108–1113. <https://doi.org/10.1126/science.aax0149>
- Ruiz-carrascal, D. (2016). Poleka Kasue Mountain Observatory, Los Nevados Natural Park, Colombia. *Mountain Views*, 10(2), 17–20.

- SIÉ Ingeniería, Fundación Instituto de Pensamiento Complejo, CONDESAN, IDEAM, & Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2023). *Reporte de estado y dinámica de los sistemas ecológicos y sociales de la cuenca del Río Claro*. CONDESAN. <https://condesan.org/recursos/reporte-de-estado-y-dinamica-de-los-sistemas-ecologicos-y-sociales-de-la-cuenca-del-rio-claro/>
- Tenorio, E. A., Montoya, P., Norden, N., Rodríguez-Buriticá, S., Salgado-Negret, B., & Gonzalez, M. A. (2023). Mountains exhibit a stronger latitudinal diversity gradient than lowland regions. *Journal of Biogeography*, 50(6), 1026–1036. <https://doi.org/10.1111/jbi.14597>
- Tobón, C. (2022). *Los páramos de Colombia Características biofísicas, ecohidrología y cambio climático*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- UNAL, & Corpocaldas. (2014). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Chinchiná Departamento de Caldas*. Corpocaldas; ASOCARS. <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1508/2017/03-09/01-SintesisPOMCARioChinchina.pdf>
- Venter, O., Sanderson, E. W., Magrach, A., Allan, J. R., Beher, J., Jones, K. R., Possingham, H. P., Laurance, W. F., Wood, P., Fekete, B. M., Levy, M. A., & Watson, J. E. M. (2016). Global terrestrial Human Footprint maps for 1993 and 2009. *Scientific Data*, 3(1), 160067. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.67>
- WCS, & Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2015). Contrato de prestación N° 13-13-014-360CE: *Caracterización Biótica Del Complejo De Páramos Los Nevados en jurisdicción de Corpocaldas, CARDER y CORTOLIMA* (p. 582). Instituto Humboldt; WCS.