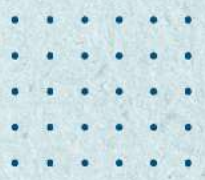
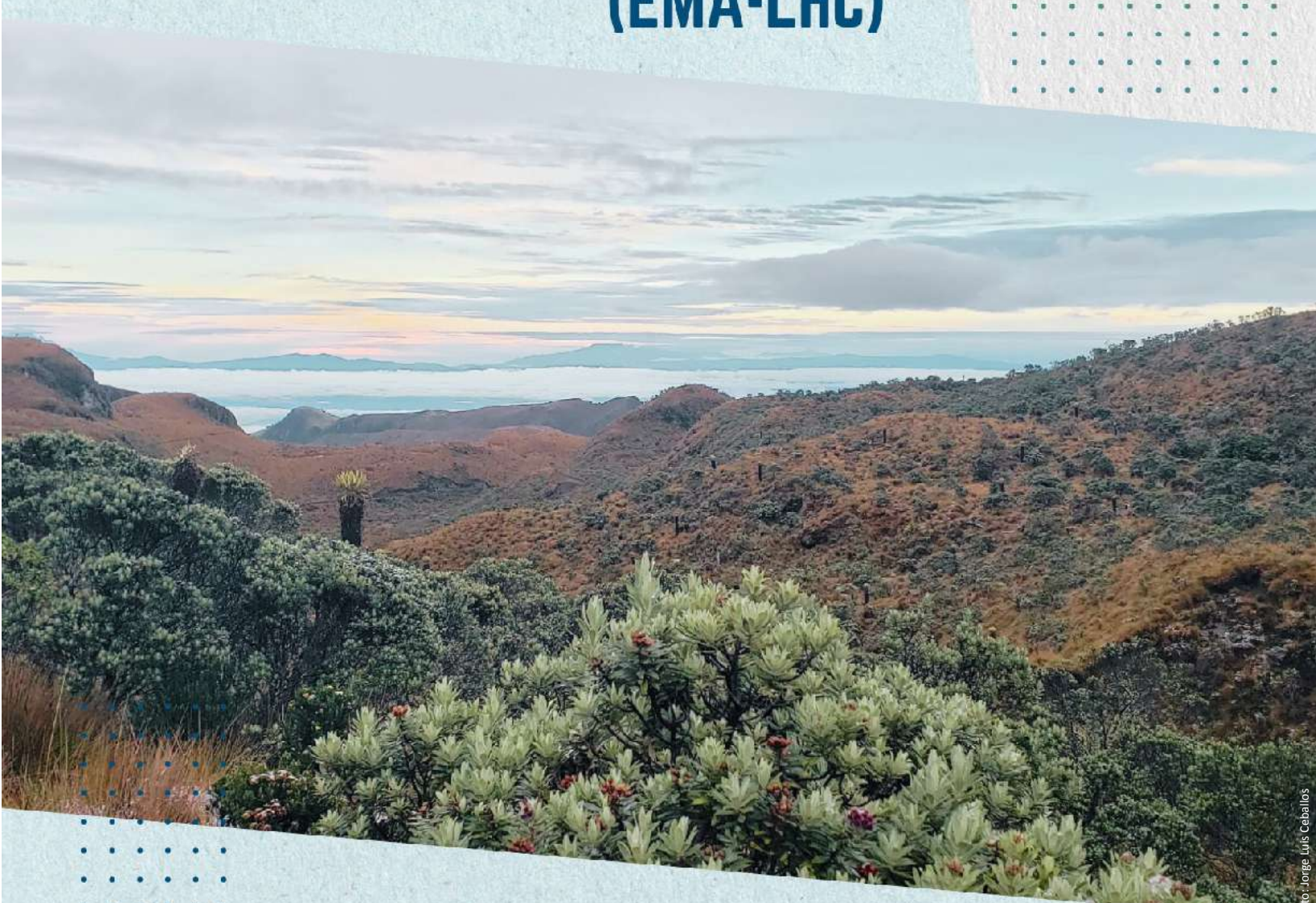


LINEAMIENTOS DE MONITOREO HIDROCLIMÁTICO A ESCALA DE PAISAJES EN SOCIOECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA EN COLOMBIA (EMA-LHC)



CONDESAN
Corporación para el Desarrollo y la Conservación
de los Recursos Acuáticos




SIÉ INGENIERÍA
Soluciones Integrales

Grupo de trabajo académico en
Ingeniería Hidroclimática y Ambiental

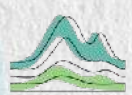


MANIZALES, MAYO 2024



 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Agency for Development
and Cooperation SDC



ADAPTACIÓN EN
LAS ALTURAS

foto: Jorge Luis Ceballos

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro sincero agradecimiento al IDEAM y sus profesionales Jorge Luis Ceballos y Edgar Augusto Blanco; al Instituto Humboldt y sus profesionales Ana Belén Hurtado y Camilo Rodríguez; a Corpocaldas y en particular a Marta Patricia García de la Subdirección de Planificación Ambiental del Territorio; al Profesor Conrado Tobón de la Universidad Nacional Sede Medellín; a los profesores Andrés Guerrero y Carlos Leopoldo Piedrahita de la Universidad de Caldas; a Maria Elena Gutierrez L., Enrique A. Sanint y Oscar David Álvarez de la Escuela de Ingeniería de Antioquia y el Observatorio Poleka Kasue; y a CONDESAN y sus profesionales Saskia Flores, Alejandra Melfo y Rafael Rodríguez por su apoyo y valiosos aportes para el desarrollo de este proyecto. Agradecemos al programa Adaptación en las Alturas, financiado por la Agencia de Cooperación Suiza para el Desarrollo (COSUDE) y coordinado en los Andes por CONDESAN, por el financiamiento para la consolidación de este protocolo en el marco de la EMA.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1.SÍNTESIS | 6 |
| 2.INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| 2.1. ESTRUCTURA, CONTENIDO Y CONEXIONES INTERNAS DE LA EMA-LHC..... | 8 |
| 2.2. HIDROLOGÍA Y EL CICLO HIDROLÓGICO | 10 |
| 2.3. IMPORTANCIA HIDROLÓGICA DE ALTA MONTAÑA..... | 12 |
| 2.1. ALCANCE DEL DOCUMENTO | 14 |
| 3. ANTECEDENTES Y CARACTERIZACIÓN DE LA ALTA MONTAÑA PARA EL MONITOREO HIDROCLIMÁTICO | 16 |
| 3.1. CONTEXTO LEGAL | 16 |
| 3.2. CONTEXTO DE LA EMA..... | 17 |
| 3.3. CLASIFICACIÓN BIOGEOGRÁFICA DE ECOSISTEMAS DE PÁRAMO EN COLOMBIA..... | 18 |
| 3.4. CLASIFICACIÓN BIOGEOFÍSICA Y DE COBERTURAS DE ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA..... | 20 |
| 3.4.1. Morfogénesis de la alta montaña..... | 21 |
| 3.4.2. Franjas altitudinales o zonas de vida paramuna | 23 |
| 3.4.3. Coberturas de los ecosistemas de alta montaña..... | 26 |
| 3.5. PRINCIPALES ASPECTOS DEL BALANCE HIDROLÓGICO EN ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA DE COLOMBIA | 28 |
| 3.5.1. Variabilidad de la temperatura | 29 |
| 3.5.2. Variabilidad de la precipitación..... | 30 |
| 3.5.3. Variabilidad de la humedad relativa | 31 |
| 3.5.4. Radiación solar | 31 |
| 3.5.5. Glaciares..... | 31 |
| 3.5.6. Vegetación | 32 |
| 3.5.7. Intercepción de la precipitación y de la niebla | 34 |
| 3.5.8. Evaporación y transpiración..... | 36 |
| 3.5.9. Suelos | 37 |
| 3.5.10. Lagunas, humedales, y turberas..... | 38 |
| 3.5.11. Aguas subterráneas | 39 |
| 3.6. IMPACTOS ANTRÓPICOS EN ECOSISTEMAS DE PARAMO | 40 |
| 3.7. INICIATIVAS DE MONITOREO HIDROCLIMÁTICO EN ALTA MONTAÑA | 41 |
| 3.7.1. Monitoreo hidrometeorológico del IDEAM | 41 |
| 3.7.2. Monitoreo de glaciares del IDEAM | 44 |



| | |
|--|----|
| 3.7.3. Monitoreo de aguas subterráneas IDEAM | 45 |
| 3.7.4. Monitoreo iMHEA | 46 |
| 3.7.5. Iniciativas de monitoreo afines | 47 |
| 3.7.6. Protocolos de monitoreo hidroclimático | 48 |
| 3.8. ASPECTOS CRÍTICOS IDENTIFICADOS: CONVERSATORIO WEB EMA LHC | 50 |
| 4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA LA ALTA MONTAÑA | 51 |
| 4.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS | 51 |
| 4.2. METODOLOGÍA GENERAL PARA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA | 52 |
| 4.3. EJEMPLO: MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA CON TETIS | 53 |
| 4.4. SÍNTESIS RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN PARA EL MODELO TETIS | 55 |
| 4.5. ENTIDADES ACADÉMICAS Y/O INVESTIGATIVAS CON PUBLICACIONES EN TEMÁTICAS DE HIDROLOGÍA EN ALTA MONTAÑA EN COLOMBIA | 58 |
| 5. MARCO CONCEPTUAL DEL MONITOREO EN ALTA MONTAÑA | 60 |
| 6. MARCO ESTRATÉGICO GENERAL DE LA EMA LHC | 62 |
| 6.1. OBJETIVOS GENERALES DE LA EMA LHC | 62 |
| 6.2. LINEAMIENTOS GENERALES | 63 |
| 6.3. MONITOREO PARTICIPATIVO | 65 |
| 6.4. CONEXIONES CON OTRAS ESCALAS | 67 |
| 6.4.1. Conexiones y aportes a la escala internacional | 67 |
| 6.4.2. Conexiones y aportes a la escala nacional | 68 |
| 6.4.3. Conexiones con la escala de complejos de páramos | 70 |
| 6.4.4. Conexiones con la escala de parcelas | 70 |
| 6.5. OBJETIVOS PARA LA ESCALA DE PAISAJES | 70 |
| 6.5.1. Condición inicial 1: Paisajes hidrográficos con iniciativas de monitoreo hidroclimático | 71 |
| 6.5.2. Condición inicial 2: Paisajes hidrográficos sin iniciativas de monitoreo hidroclimático | 75 |
| 7. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO HIDROCLIMÁTICO A ESCALA DE PAISAJE | 78 |
| 7.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN | 78 |
| 7.1.1. Identificación de procesos de ordenamiento del territorio que incluyan el paisaje de estudio | 79 |
| 7.1.2. Identificación de actores | 79 |
| 7.1.3. Identificación de aspectos culturales de gobernanza y socioeconómicos, asociados al monitoreo participativo | 80 |
| 7.1.4. Identificación de iniciativas de monitoreo | 81 |
| 7.1.5. Identificación de características diferenciales del área de estudio | 81 |
| 7.1.6. Información de usos y coberturas para la región de estudio | 81 |
| 7.1.7. Información de suelos | 81 |

| | |
|---|-----|
| 7.1.8. Identificación de modelos hidrológicos disponibles para la región | 81 |
| 7.2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS | 81 |
| 7.3. PLAN DE MONITOREO | 83 |
| 7.3.1. Monitoreo comunitario participativo | 83 |
| 7.3.2. Arreglos entre actores para el desarrollo de objetivos de monitoreo | 83 |
| 7.3.3. Programas complementarios de monitoreo | 83 |
| 7.3.4. Cantidad y emplazamiento de estaciones de monitoreo | 84 |
| 7.3.5. Métodos y técnicas de monitoreo | 85 |
| 7.3.6. Recolección/transmisión de datos | 88 |
| 7.3.7. Comunicación de resultados | 88 |
| 7.3.8. Estrategias de financiamiento | 89 |
| 8. ESTUDIO DE CASO RIO CLARO | 90 |
| 8.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN | 92 |
| 8.2. ESTADO ACTUAL Y DEFINICION DE OBJETIVOS DE MONITOREO | 93 |
| 8.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO | 94 |
| 8.3.1. Análisis de microcuencas para implementación de monitoreo iMHEA | 94 |
| 8.3.1. Gestión de información y arreglos institucionales para uso compartido de información | 95 |
| 8.3.2. Modelación hidrológica | 96 |
| 8.3.3. Estaciones de monitoreo para recuperación y mantenimiento | 96 |
| 8.3.4. Propuestas complementarias para iniciativas de monitoreo existentes | 97 |
| 8.3.5. Resultados objetivos asociados a caracterización hidroclimática (O_CHC) | 97 |
| 8.3.6. Resultados objetivos asociados modelación hidrológica de impacto de cambios en coberturas (O_MHICob) | 100 |
| 8.3.7. Perspectivas | 102 |
| 9. RECOMENDACIONES FINALES | 103 |
| ESTACIONES DE MONITOREO IDEAM | |
| EN REGIONES DE ALTA MONTAÑA Y COMPLEJOS DE PÁRAMO ASOCIADOS | |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Esquema diseño del sistema de monitoreo | 11 |
| Figura 2. Simplificación del ciclo hidrológico en alta montaña | 13 |
| Figura 3. Franjas de gradiente altitudinal y pisos morfogénicos | 27 |
| Figura 4. Ciclo general de manejo en los suelos paramunos | 28 |
| Figura 5. Conductividad hidráulica para 7 páramos de Colombia | 40 |
| Figura 6. Estaciones limnigráficas y limnimétricas por encima de los 2700 m s.n.m..... | 45 |
| Figura 7. Glaciares de Colombia | 46 |
| Figura 8. Sistemas acuíferos de las provincias hidrogeológicas montañas e intramontañas | 48 |
| Figura 9. Síntesis metodología modelación hidrológica distribuida | 54 |
| Figura 10. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS..... | 56 |
| Figura 11. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS (simplificación 2D)..... | 57 |
| Figura 12. Síntesis etapa de recolección y procesamiento de información para el modelo TETIS | 58 |
| Figura 13. Ecuación de búsqueda para indagación de instituciones con investigaciones en hidrología en alta montaña | 60 |
| Figura 14. Investigadores en temas de hidrología de alta montaña en Colombia | 60 |
| Figura 15. Instituciones en temas de hidrología de alta montaña en Colombia..... | 61 |
| Figura 16. Síntesis factores de cambio y variables respuesta EMA-LHC..... | 62 |
| Figura 17. Principales ecosistemas altoandinos y sistemas de reemplazo a lo largo de gradientes de elevación y gradientes de transformación/sucesión..... | 63 |
| Figura 18. Síntesis de la estrategia para la construcción de objetivos en la EMA-LHC | 80 |
| Figura 19. Ubicación de un pluviómetro..... | 87 |
| Figura 20. Pluviómetro de Balancín | 89 |
| Figura 21. Área de estudio (ADE) ejercicio piloto Río Claro y estaciones de monitoreo hidroclimático | 92 |
| Figura 22. Coberturas año 2006 | 93 |
| Figura 23. Coberturas año 2018 | 93 |
| Figura 24. Dinámica de cambios en coberturas para el ADE, Nivel 1 CLC entre los años 2006-2018..... | 93 |
| Figura 25. Microcuencas con estaciones de monitoreo en el ADE con potencial para monitoreo tipo iMHEA..... | 96 |
| Figura 26. Mapa temperatura mínima..... | 100 |
| Figura 27. Mapa humedad relativa promedio..... | 100 |
| Figura 28. Régimen de precipitación mensual (mm/mes) estación Santa Isabel CDIAC (4812 msnm)..... | 100 |
| Figura 29. Régimen de precipitación mensual (mm/mes) estación Río Claro PNN CDIAC (4178 msnm) | 100 |
| Figura 30. Régimen de caudales con registros de la estación SAN ANTONIO [26157210]..... | 100 |
| Figura 31. Caudales diarios multianuales en la estación SAN ANTONIO [26157210] | 100 |
| Figura 32. Extensión y espesor del Glaciar años 2014 al 2019..... | 101 |
| Figura 33. Interflujo condiciones secas..... | 101 |
| Figura 34. Interflujo condiciones húmedas..... | 101 |
| Figura 35. Comparación de curvas de duración de caudales condiciones de coberturas 2006 y 2018 | 102 |
| Figura 36. Comparación de hidrogramas de caudales simulados con el modelo TETIS. (2005-2023)..... | 102 |
| Figura 37. Flujos Internos en la calibración del modelo TETIS condiciones de coberturas 2006 y 2018..... | 103 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|---------------------|
| Tabla 1. Clasificación biogeográfica de los páramos en Colombia | 22 |
| Tabla 2. Principales coberturas naturales en la alta montaña de acuerdo a la Leyenda Nacional Corine Land Cover | 29 |
| Tabla 3. Clasificación de páramos de acuerdo al rango de precipitación anual (mm) | 32 |
| Tabla 4. Relación entre tipos fisionómicos de páramo y coberturas CLC | 36 |
| Tabla 5. Lagunas en sectores de alta montaña | 41 |
| Tabla 6. Tipos de estaciones y variables medidas en la red de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM ... | 44 |
| Tabla 7. Complejos con estaciones limnigráficas o limnimétricas activas del IDEAM | 45 |
| Tabla 8. Iniciativas de monitoreo afines al componente hidrológico | 49 |
| Tabla 9. Síntesis de protocolos integrados a la estructura del EMA-LHC..... | 50 |
| Tabla 10. Síntesis de herramientas, bases de datos, modelos y ecuaciones para la especificación del modelo TETIS | 58 |
| Tabla 11. Características diferenciales en paisajes de alta montaña relevantes para la selección de ventanas de monitoreo | 71 |
| Tabla 12. Importancia relativa de flujos dentro del balance hidrológico | 77 |
| Tabla 13. Procesos comunes de ordenamiento territorial | 82 |
| Tabla 14. Ejemplos típicos de actores..... | 82 |
| Tabla 15. Fuentes de información para identificación de aspectos culturales, de gobernanza y socioeconómicos..... | 83 |
| Tabla 16. Síntesis de relaciones entre objetivos propuestos y monitoreo de variables para su alcance | 84 |
| Tabla 17. Aspectos complementarios para el desarrollo del monitoreo participativo comunitario de la EMA.... | 86 |
| Tabla 18. Referencias con lineamientos para emplazamiento de estaciones de monitoreo hidroclimático y afines..... | 88 |
| Tabla 19. Referencias con lineamientos metodológicos y técnicas para el monitoreo de variables hidrometeorológicas y afines | 89 |
| Tabla 20. Dinámica de coberturas para el nivel uno de clasificación (datos en hectáreas)..... | 93 |
| Tabla 21. Referencias con lineamientos metodológicos y técnicas para recolección y transmisión de datos...94 | 94 |
| Tabla 22. Referencias con lineamientos metodológicos y técnicas para recolección y transmisión de datos...95 | 95 |
| Tabla 23. Estaciones de monitoreo inactivas o en mantenimiento..... | 98 |
| Tabla 24. Objetivos de monitoreo asociadas a la caracterización hidroclimática O CHC | 99 |
| Tabla 25. Caudal promedio e índice de regulación hídrica para diferentes escenarios de coberturas..... | 103 |
| Tabla 26. Complejos con estaciones limnigráficas o limnimétricas del IDEAM cercanas o asociadas a complejos de páramo..... | 106 |

1. SÍNTESIS

La **EMA-LHC** corresponde a la aplicación de la “Estrategia de Monitoreo de Ecosistemas de Alta Montaña” (**EMA**) para el desarrollo de “Lineamientos Hidro-Climáticos” (**LHC**), que orienten el diseño de sistemas de monitoreo a escala de paisajes.

La EMA es una estrategia para la integración de los sistemas de monitoreo existentes en la región de alta montaña en Colombia, que permite analizar sus dinámicas ante diferentes factores o motores de cambio como las dinámicas sociales y económicas, el uso de la tierra y el cambio climático (IDEAM et al., 2018). Uno de los principales componentes del sistema de monitoreo integrado de la EMA, corresponde al hidroclimático, ya que permite la aproximación a dos de los servicios ecosistémicos más importantes de la alta montaña: la oferta hídrica y la regulación hídrica.

Teniendo en cuenta lo anterior y los resultados preliminares del ejercicio piloto de la EMA, donde se identificaron oportunidades para el desarrollo de la componente hidroclimática (SIÉ Ingeniería et al., 2023), se propone el desarrollo de la EMA-LHC, que se presenta en este documento.

Aunque está diseñada para la escala de paisaje, la EMA-LHC hace importantes aportes a la escala nacional a través de una caracterización de los ecosistemas de alta montaña desde diferentes áreas, que permite a los interesados en el desarrollo de estrategias de monitoreo, seleccionar el paisaje que se adecue a sus intereses específicos.

Además de la caracterización de los ecosistemas de alta montaña que contribuye a la comprensión de su diversidad desde el punto de vista hidroclimático y antrópico, la EMA-LHC, busca fomentar el uso de la modelación hidrológica distribuida, y del monitoreo participativo comunitario.

En el caso de la modelación hidrológica la EMA-LHC tiene dos propósitos fundamentales: 1) profundizar en el conocimiento científico de las variables del balance hídrico y sus interacciones en ecosistemas de alta montaña, lo que a su vez permite relacionar de una forma más precisa los principales factores de cambio (cambios de coberturas y usos de la tierra, variabilidad y cambio climático) y las principales variables respuesta (oferta y regulación hídrica) del sistema hidrológico; y 2) se pretende contribuir con información para los programas de pagos por servicios ambientales, de manera que cuenten con datos de los beneficios potenciales de sus programas de conservación, restauración y reconversión productiva, en términos de aumento de la oferta y la regulación hídrica.

Con el monitoreo comunitario, se busca incentivar y apoyar las iniciativas de conservación, restauración y reconversión productiva, que favorezcan los ecosistemas de alta montaña y la recuperación de sus servicios ecosistémicos, que constituyen en última instancia uno de los objetivos más importantes de una iniciativa de monitoreo. Aunado a esto se pueden lograr beneficios adicionales como el fortalecimiento la gobernanza de los territorios y el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes. En conexión con la escala regional el monitoreo hidroclimático participativo también puede contribuir al despliegue del componente participativo de

los Planes de Manejo Ambiental de los Complejos de Páramos, y a escala nacional, al desarrollo de las políticas públicas alrededor de los ecosistemas de alta montaña y de la conservación del recurso hídrico. En conjunto, se espera que la modelación hidrológica y el monitoreo hidroclimático comunitario coadyuven a la consolidación de los sistemas de pagos por servicios ambientales (PSA) en Colombia.

El documento también señala direcciones para el avance del monitoreo hidroclimático en alta montaña, que incluye por una parte aspectos identificados en otras fuentes de información, como la medición de la precipitación horizontal y las aguas subterráneas, y por otro lado los aspectos evidenciados en el desarrollo de este protocolo, como la necesidad de mejorar la calidad de la información hidroclimática, la recuperación de estaciones de monitoreo y el emplazamiento de nuevas, la medición periódica de dinámicas de coberturas y su adaptación a los tipos de vegetación de alta montaña y la generación de información de propiedades hidrológicas de suelos, entre otros.

Los lineamientos de este protocolo se llevan a la práctica por medio de la formulación de objetivos de monitoreo de alcance progresivo que se establecen principalmente en función de la información disponible, de los intereses de las entidades que apoyan la implementación de estrategias de monitoreo en paisajes de alta montaña, de los actores involucrados, y de las características diferenciales de las ventanas de observación o paisaje donde se desarrollen nuevas iniciativas.

La EMA-LHC se desarrolló en conjunto con un estudio de caso para facilitar la comprensión de la herramienta, y su posterior implementación con base a objetivos de monitoreo. Adicionalmente se socializó con un grupo de expertos en un taller virtual para discutir sus aspectos críticos. Se espera pues que la EMA-LHC se constituya en un referente para el desarrollo de iniciativas de monitoreo integrado en otros paisajes de alta montaña en Colombia, que ayuden a la protección de sus ecosistemas y a la conservación del recurso hídrico. Debido a las características del paisaje del ejercicio piloto, con poca presencia de comunidades que hacen vida en los paisajes de alta montaña, no se pudo implementar en términos prácticos el monitoreo participativo, pero se presentan lineamientos para su desarrollo en futuras iniciativas. Para el siguiente ejercicio de la EMA a escala de paisajes, sería ideal la selección de un paisaje de monitoreo donde sea factible la integración de las comunidades para trabajar enfocados hacia objetivos de conservación, restauración y reconversión, fundamentales en el espíritu de esta iniciativa de monitoreo.



2. INTRODUCCIÓN



2.1. ESTRUCTURA, CONTENIDO Y CONEXIONES INTERNAS DE LA EMA-LHC

La EMA-LHC está dividida en nueve secciones: [\(1\) Síntesis](#), [\(2\) Introducción](#), [\(3\) Antecedentes](#), [\(4\) Modelación hidrológica para alta montaña](#), [\(5\) Marco conceptual](#), [\(6\) Marco estratégico](#), [\(7\) Diseño del sistema de monitoreo](#), [\(8\) Caso de estudio](#) y [\(9\) Recomendaciones](#).

En esta sección introductoria, se presenta la estructura general del documento (2.1), se abordan algunos conceptos fundamentales asociados al ciclo hidrológico (2.2), se destaca la importancia de los ecosistemas de alta montaña para el recurso hídrico en Colombia (2.3) y se delimita el alcance de la EMA-LHC (2.1).

La sección de antecedentes (3) ofrece un panorama integral para el monitoreo hidroclimático abordando distintos contextos y caracterizando la alta montaña desde diferentes niveles y áreas. En el contexto legal (3.1) se presentan los instrumentos normativos más relevantes que justifican los esfuerzos de monitoreo enfocados al recurso hídrico en la alta montaña. En el contexto de la EMA (3.2), se sintetizan los principales elementos y avances de la estrategia, y se destaca la importancia de la componente hidroclimática.

La caracterización de la alta montaña incluye los aspectos diferenciales más relevantes a nivel geográfico (3.3), a nivel biogeofísico y a nivel de coberturas (3.4), que resultan clave para orientar el desarrollo de la EMA-LHC a escala nacional en términos de la selección de nuevos paisajes de monitoreo. Estos aspectos diferenciales se trasladan a las variables del balance hidrológico que en consecuencia muestran variabilidad geográfica, a lo largo del gradiente altitudinal y en el ámbito regional. Para cada una de las principales variables se analizan y exponen estas características diferenciales (3.5). Las siguientes subsecciones incluyen los impactos antrópicos en ecosistemas de alta montaña (3.6), determinantes para el balance hídrico; las principales iniciativas de monitoreo hidroclimática y asociadas (3.7), y finalmente, los aspectos críticos identificados en la socialización de la EMA LHC (3.8) (Fundación IPC, SIÉ Ingeniería, CONDESAN, et al., 2023).

El documento continúa con una aproximación al tema de modelación hidrológica distribuida (4.1), fundamental para el alcance de los objetivos más complejos del monitoreo hidroclimático, y para la consolidación de esquemas de pago por servicios ambientales. En esta sección se plantea una metodología genérica para la implementación de modelos hidrológicos distribuidos (4.2), que profundiza en la etapa de recolección de información, y se ejemplifica para el caso del modelo hidrológico Tetis (4.3 y 4.4). El objetivo es facilitar el análisis comparativo entre modelos hidrológicos distribuidos desde sus requerimientos de información, para identificar vacíos y las necesidades de datos específicos que permitan un mejor ajuste a las condiciones diferenciales de la alta montaña. Finalmente, la sección ofrece una estrategia de cienciometría, con la que se identificaron los principales investigadores e instituciones académicas en el país (4.5), que pueden aportar al desarrollo de la modelación hidrológica en la alta montaña.

Los principales aspectos conceptuales de la EMA enfocados al área hidroclimática en alta montaña se presentan en la sección 5, estos, orientan a su vez el marco estratégico de la EMA LHC. La sección de marco estratégico (6) parte de los objetivos de la EMA adaptados a la componente hidroclimática (6.1), y propone unos lineamientos generales (6.2) que abordan múltiples intereses de monitoreo, para el planteamiento de objetivos de alcance secuencial a escala de paisaje, y para el diseño del sistema de monitoreo hidroclimático, profundizando en la integración de comunidades (6.3) y en la conexión con las escalas espaciales de la EMA (6.4). Los objetivos a escala de paisaje (6.5) se plantean teniendo en cuenta la información disponible de variables de monitoreo, mientras incorpora los intereses de los actores potenciales y los lineamientos definidos previamente.

La sección de diseño del sistema de monitoreo propone la recolección de una serie de información que atañe al monitoreo hidroclimático (7.1), con la que se establecen la condición inicial del área de estudio y las variables disponibles, para en función de estas, identificar fácilmente los objetivos a escala de paisaje (7.2) y planificar las actividades de monitoreo (7.3). Para la planificación de estas actividades se incluyen estrategias diferenciales y lineamientos más detallados para el monitoreo participativo, recomendaciones y/o referencias para la ubicación de estaciones, técnicas de medición, procedimientos para la recolección, transmisión de datos y procesamiento de información.

Finalmente se presentan las recomendaciones y el estudio de caso para el diseño del sistema de monitoreo en el área piloto de Rio Claro. Este ejemplo de aplicación sigue los pasos de la sección de diseño del sistema de monitoreo, mostrando los resultados de los objetivos para la escala de paisaje que se logran con la información a la que pudo accederse, y dejando planteados los objetivos subsecuentes a alcanzar y los avances respectivos realizados.

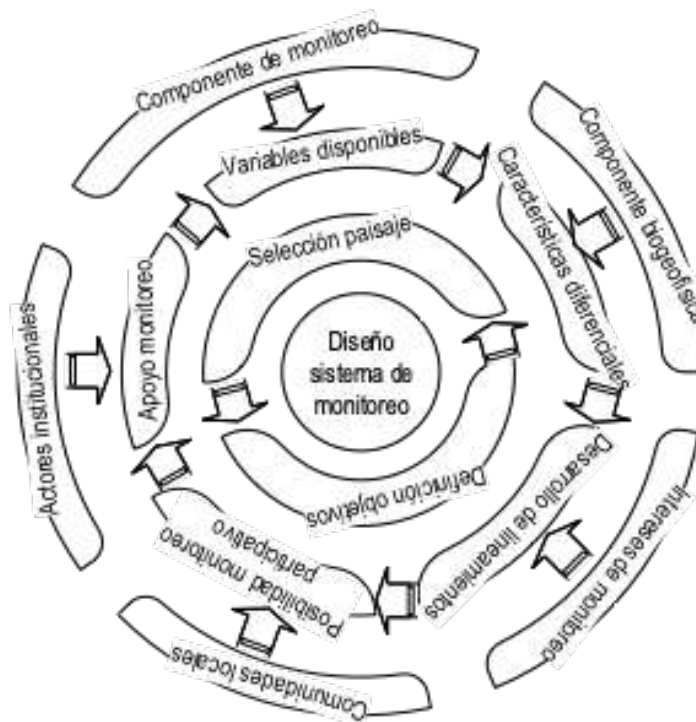


Figura 1. Esquema diseño del sistema de monitoreo

Fuente: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

La Figura 1 esquematiza las relaciones internas de la EMA-LHC para el diseño de un sistema de monitoreo hidroclimático. De los elementos exteriores incluidos principalmente en las primeras secciones del documento, dependen situaciones concretas que atañen al marco estratégico, así, de las iniciativas de monitoreo dependen las variables disponibles para un área de estudio; de las comunidades locales depende la posibilidad de realizar o no monitoreo participativo; dependiendo de los intereses de monitoreo se podrán desarrollar uno o varios de los lineamientos planteados; de las componente biogeofísica dependen algunas características diferenciales del paisaje, y de la presencia de actores institucionales dependerá la posibilidad de su apoyo.

Estos elementos en conjunto, permiten definir el paisaje y los objetivos de monitoreo, que se construyen en una relación de interdependencia. Por ejemplo, un “interés de monitoreo” (parte externa Figura 1), puede ser la estimación del aporte de un glaciar a la oferta hídrica de un paisaje, con lo que se desarrolla un lineamiento de este protocolo (parte intermedia Figura 1) que es el de la profundización en el conocimiento de variables del ciclo hidrológico (sección 6.2), a su vez este interés por los glaciares, perfila la selección del paisaje y define automáticamente un objetivo (parte interior Figura 1), asociado a dicho interés. Finalmente, con estos objetivos se orienta el diseño del sistema de monitoreo.

La Figura 1 sugiere que no solo los intereses definen los objetivos de monitoreo, también las situaciones prácticas del marco estratégico (parte intermedia Figura 1) como la disponibilidad de información de ciertas variables, o la presencia de comunidades interesadas en el monitoreo participativo. En este sentido las diferentes secciones de la EMA LHC están interrelacionadas, por lo que, a lo largo de la presentación del texto, se hará referencia a secciones anteriores y posteriores, que dan cuenta de las múltiples conexiones entre los contenidos esbozados en la Figura 1.

2.2. HIDROLOGÍA Y EL CICLO HIDROLÓGICO

La hidrología es una disciplina científica que se dedica al estudio de las aguas en la Tierra, comprendiendo su distribución espacial y temporal, movimiento y características (Llambí et al., 2012). Su objetivo es entender y cuantificar los procesos del ciclo hidrológico, entendido como la circulación continua del agua en la naturaleza a través de flujos y almacenamientos relacionados con fenómenos como la evaporación, la condensación, la precipitación, la infiltración, el flujo superficial y el subterráneo (GIMHA, 2021). Estos procesos son producto de la interacción del agua con diversos factores del medio natural, como el clima, el relieve, las coberturas, los suelos y el subsuelo.

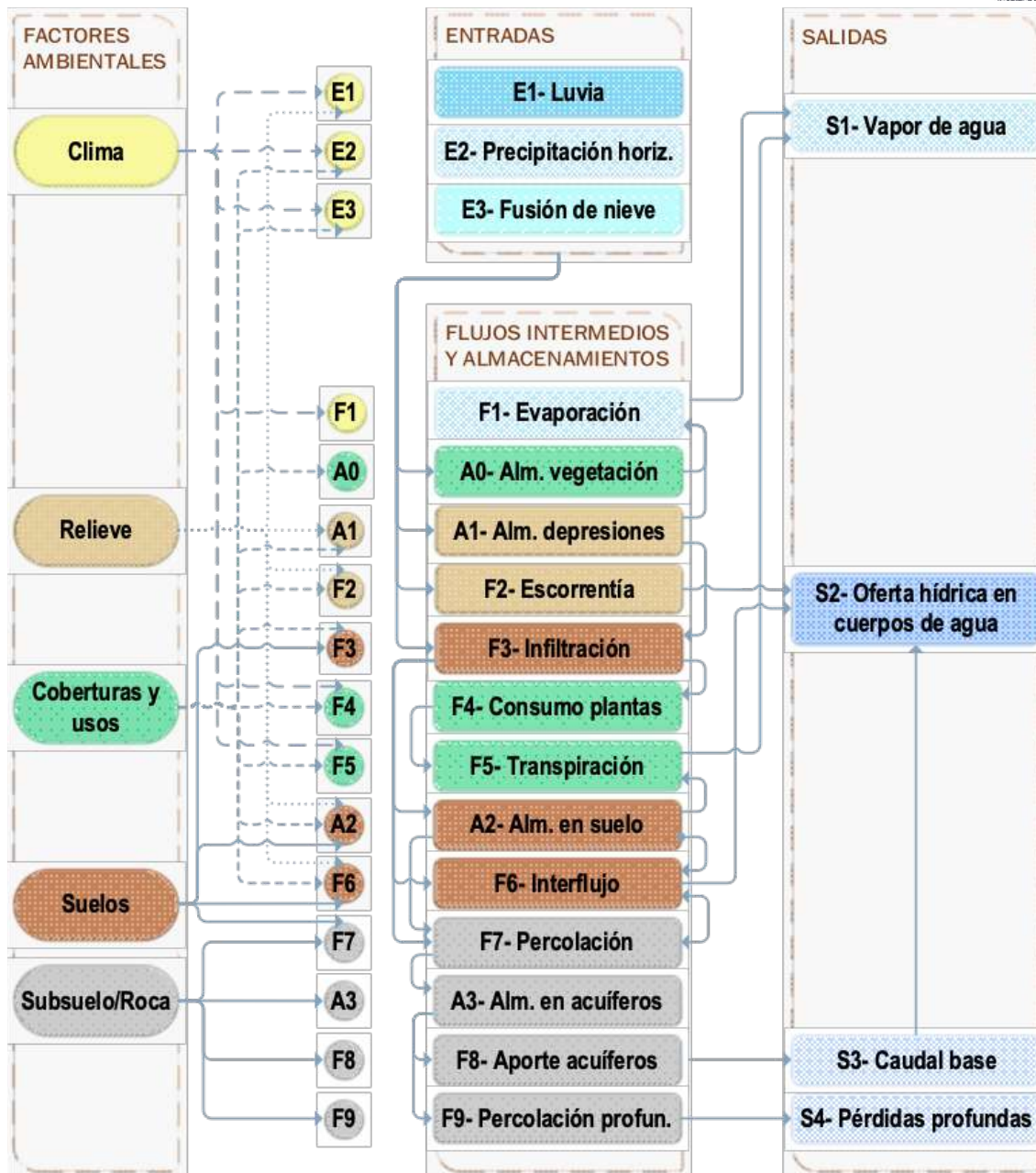


Figura 2. Simplificación del ciclo hidrológico en alta montaña

Fuente: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

La Figura 2, representa una simplificación del balance hidrológico para alta montaña, en términos de factores ambientales, flujos y almacenamientos [A]. Los flujos pueden representar entradas del balance hídrico [E], salidas [S], o flujos intermedios [F]. En la parte central del diagrama, se muestran las principales relaciones entre flujos y almacenamientos, y para cada uno de ellos, los factores ambientales con mayor influencia (lado derecho Figura 2). Por ejemplo, la escorrentía [F2], depende de los flujos de entrada [E1, E2, E3], y aporta directamente a la oferta hídrica [S2]; entre tanto, sus principales factores ambientales de influencia son el relieve, las coberturas y los usos del suelo.

El factor ambiental climático, que abarca variables como la temperatura, la radiación solar, la humedad y la precipitación, juega un papel fundamental en diferentes procesos del ciclo hidrológico. La temperatura y la radiación solar afectan la tasa de evaporación y transpiración de las plantas, mientras que la lluvia, la nieve, y la precipitación horizontal determinan la cantidad y distribución espacial del agua que entra al ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico también se ve influenciado por otros factores ambientales relacionados con el entorno físico, como el relieve, las coberturas del suelo, las propiedades del suelo y la hidrogeología. La geomorfología o relieve terrestre, determina la dirección y velocidad del flujo del agua. Las pendientes, valles y cuencas hidrográficas influyen en el movimiento del agua en la superficie a través de corrientes hídricas y en su acumulación en pantanos, humedales, y lagunas. Las coberturas del suelo, como los bosques, los cultivos o las áreas urbanas, afectan la infiltración, la evapotranspiración y escorrentía del agua. Las propiedades físicas y químicas del suelo, como su textura, estructura y capacidad de retención de agua, influyen en la infiltración, almacenamiento, regulación y disponibilidad de agua en el suelo. Además, la hidrogeología, también es relevante, ya que determina la presencia de acuíferos, su conectividad y capacidad de almacenamiento de agua subterránea (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010).

La hidrología desempeña un papel clave en el enfrentamiento de los impactos del cambio climático y los cambios en coberturas y usos del suelo. Los efectos del cambio climático, como el aumento de las temperaturas, la alteración de los patrones de precipitación y evapotranspiración y el aumento de la intensidad de sequías e inundaciones, afectan directamente la distribución y disponibilidad del agua para los ecosistemas, para el consumo humano, para la agricultura y para otros sectores clave. Asimismo, los cambios en los usos del suelo, como la ganadería, la deforestación y la urbanización, modifican la capacidad del suelo para retener y filtrar el agua, agravando aún más los desafíos relacionados con el recurso hídrico (IDEAM, 2002)

El estudio de estas relaciones y la implementación de modelos hidrológicos para la simulación del impacto de diferentes escenarios climáticos, de cambios en coberturas y usos del suelo sobre los servicios ecosistémicos de oferta y la regulación hídrica, es esencial para orientar a los planificadores y tomadores de decisiones que desarrollan estrategias de gestión de recursos hídricos considerando los impactos presentes y futuros.

Sin embargo, la hidrología y la modelación hidrológica no pueden abordar estos desafíos por sí solas. Es esencial ampliar los sistemas de recolección de información a través de estrategias de monitoreo que integren variables en múltiples áreas de conocimiento (meteorología, coberturas, suelos, vegetación, hidrogeología), e involucrar a las comunidades en la protección y restauración dirigidas a la conservación del recurso hídrico. Las comunidades pueden desempeñar un papel activo en la gestión sostenible del agua a través de la implementación de prácticas como el monitoreo participativo, la conservación de ecosistemas estratégicos, la reforestación de cuencas hidrográficas o el manejo sostenible de los suelos (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010), lo cual puede ser promovido a través de esquemas de pago por servicios ambientales (PSA) (MADS, 2021). Además, la educación y la integración de la comunidad son fundamentales para promover la conciencia y la responsabilidad en la protección y uso eficiente del agua.

2.3. IMPORTANCIA HIDROLÓGICA DE ALTA MONTAÑA

El páramo es el mayor proveedor de agua de Colombia. Una parte significativa de los grandes sistemas fluviales como los Ríos Magdalena, Cauca, Patía, Meta, Guaviare, Putumayo, Atrato y Ranchería nacen en la alta montaña. Estos ecosistemas son la fuente de agua de acueductos y viviendas de cientos de municipios y

veredas, y abastecen sectores como el agropecuario (grandes y medianos distritos de riego) y el de generación hidroenergética (García, 2018; Hofstede et al., 2014)

El destacado papel de la alta montaña en la provisión de agua está relacionado con las funciones hidrológicas de rendimiento hídrico y de regulación hídrica¹, y con la excelente calidad del agua en ausencia de disturbios antrópicos o naturales. El rendimiento hídrico es la relación entre el volumen de agua que ha salido de una cuenca en forma de caudales y las entradas de agua al ciclo hidrológico, que puede ser en forma de lluvia, precipitación horizontal, y fusión de hielo y nieve. La regulación hídrica hace referencia al proceso por el cual un ecosistema almacena agua durante períodos húmedos, para liberarla durante los períodos secos manteniendo un flujo de caudales sostenido en el tiempo (Llambí et al., 2012). A continuación, se exponen los principales factores en la alta montaña relacionados con cada una de estas funciones hidrológicas.

El buen rendimiento hídrico de la alta montaña está intrínsecamente asociado a sus condiciones climáticas, al tipo de vegetación y al aporte de glaciares en los sectores de mayor altitud. El clima se caracteriza por bajas temperaturas, regímenes de precipitación de moderados a altos, y altas humedades relativas del aire que favorecen la formación de niebla. La vegetación al interceptar las partículas de agua de la niebla y la humedad condensada originan una entrada adicional de agua al sistema hidrológico que se conoce como precipitación horizontal. La vegetación tiene otra influencia importante en el rendimiento hídrico, ya que el consumo de agua es muy bajo, por una combinación de aspectos asociados a tasas metabólicas reducidas derivadas de las temperaturas extremas y de la escasez de nutrientes en el suelo. Como consecuencia del bajo consumo de agua de las plantas, las temperaturas reducidas y la humedad relativa cerca del punto de saturación, los valores de evapotranspiración en los páramos son generalmente bajos (excepto en páramos secos), lo que representa mayores excedentes de agua disponibles para continuar circulando en el ciclo hidrológico. Finalmente, algunas regiones cuentan con aportes hídricos de la fusión en glaciares en las partes altas, que contribuyen a los humedales, acuíferos y cauces (García, 2018; Hofstede et al., 2014).

La segunda función hidrológica denominada regulación hídrica, se explica por una combinación de factores que pueden incluir aspectos asociados al clima, la geomorfología (relieve), la presencia de acuíferos (hidrogeología), y las condiciones edáficas (suelos). En sus aspectos climáticos, los glaciares aumentan el aporte de agua cuando aumentan las temperaturas, es decir que pueden dar más agua justo en los períodos secos. Las lluvias de baja intensidad, pero recurrentes (Buytaert, 2004), ayudan a mantener aportes estables a lo largo del año, y cuando escasean, se compensan con un aumento en la precipitación horizontal (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010).

En cuanto al relieve, la geomorfología de la alta montaña, moldeada por las glaciaciones y caracterizada por un terreno accidentado en la parte inferior, da lugar a depresiones locales, concavidades y valles donde se emplazan lagos, humedales y pantanos que funcionan como reservorios naturales de agua (Buytaert, De Bièvre, et al., 2006). Los humedales de los ecosistemas de páramo también pueden presentar interacciones con las aguas subterráneas, ya sea que dependan de los caudales procedentes de acuíferos o que sean fuente de recarga. De esta manera los humedales pueden tener un papel importante en los flujos subterráneos locales, intermedios e incluso regionales que en parte determinan los caudales base aguas abajo de una cuenca hidrográfica (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010). Sin embargo, no se puede asegurar que todos los páramos sean en sí zonas de recarga, ya que esto depende de las condiciones locales y se

¹ La primera función hidrológica guarda relación con el servicio ecosistémico de oferta hídrica, y la segunda corresponde al servicio ecosistémico del mismo nombre: regulación hídrica.

limita a las zonas donde el material geológico es más permeable y permite el contacto con acuíferos profundos (Llambí et al., 2012)

En la literatura, se plantea la mayor contribución de la alta regulación de agua a los suelos del páramo, principalmente porque su elevado contenido de materia orgánica les confiere una baja densidad y alta porosidad (Buytaert, Deckers, et al., 2006). En casos de suelos de material volcánico, se forman complejos órgano-metálicos con alta capacidad para retener agua por períodos prolongados y liberarlas lenta y constantemente (Poulenard, 2000). A pesar de esto, algunos autores plantean la hipótesis de que la regulación del agua está dominada esencialmente por el clima y la geomorfología, debido a que observaciones en campo, muestran que una buena parte del agua en los suelos se almacena como volumen muerto, haciéndolos reservorios inactivos (Buytaert et al., 2005; Sarmiento, 2009).

Si bien se plantea generalmente que la vegetación del páramo tiene un importante papel en la regulación hidrológica, la mayor parte de los estudios muestran que su capacidad de retención es baja en comparación con la de los suelos; aunque, de no ser por la vegetación, los suelos no tendrán la capacidad de regulación que se les atribuye. Algunas relaciones vegetación/suelo asociadas a la regulación hídrica se describen a continuación (Hofstede, 1995):

- La vegetación ayuda a la protección y estabilización de los suelos, lo que permite conservar su capacidad de almacenamiento
- Las bajas tasas de descomposición de la materia orgánica derivadas de las bajas temperaturas, dan lugar a suelos ricos en materia orgánica, confiriéndoles mayor capacidad de almacenamiento por su alta porosidad
- Los relativamente bajos consumos de agua de la vegetación de paramo (por sus bajas tasas de transpiración), dejan la mayor parte del agua disponible para los suelos, lo que permite un mayor aprovechamiento de su capacidad de almacenamiento.

Las relaciones señaladas anteriormente, presentan a grandes rasgos los principales vínculos entre variables y parámetros del ciclo hidrológico y las características particulares de los ecosistemas de alta montaña donde se identificaron como aspectos clave algunas variables climáticas, los glaciares, la geomorfología, las coberturas vegetales, los suelos y el subsuelo.

Sin embargo, la alta montaña no es un espacio homogéneo para el estudio hidrológico, y muestra variaciones biogeográficas a escala nacional (sección 3.3), biogeofísicas y de coberturas a lo largo del gradiente altitudinal, y regionales dentro de los complejos de páramos (sección 3.4). Entender esta diversidad es relevante para el monitoreo hidrológico, ya que da claridad sobre los paisajes donde podrían implementarse iniciativas de monitoreo para capturar la multiplicidad de condiciones hidrológicas existentes, utilizando los recursos de manera óptima.

2.1.ALCANCE DEL DOCUMENTO

Este documento se enfoca en el diseño de estrategias de monitoreo hidroclimático a escala de paisajes y se construyó en diálogo con un ejercicio piloto en la cuenca alta de Río Claro (Villamaría -Caldas), por lo que aborda con mayor rigor las posibilidades asociadas a dicho paisaje de monitoreo. En este sentido la EMA LHC profundiza la temática de modelación hidrológica, y el aprovechamiento de iniciativas de monitoreo institucionales, y académicas.

El documento es riguroso en la formulación de conexiones a escala internacional y nacional, y plantea lineamientos preliminares para la conexión con la escala de complejos de páramo y de parcelas, donde se prevé una mayor incidencia del componente participativo, que debido a las particularidades de Rio Claro (Tabla 21, sección 8.1), no pudo explorarse en términos prácticos.





3. ANTECEDENTES Y CARACTERIZACIÓN DE LA ALTA MONTAÑA PARA EL MONITOREO HIDROCLIMÁTICO

Esta sección ofrece un panorama integral para el monitoreo hidroclimático abordando distintos contextos y caracterizando la alta montaña desde diferentes niveles y áreas. En el contexto legislativo (3.1) se presentan los instrumentos normativos más relevantes que justifican los esfuerzos de monitoreo enfocados al recurso hídrico en la alta montaña. En el contexto de la EMA (3.2), se sintetizan los principales elementos y avances de la estrategia, y se destaca la importancia del componente hidroclimático.

La caracterización de la alta montaña incluye los aspectos diferenciales más relevantes a nivel geográfico (3.3), a nivel biogeofísico y a nivel de coberturas (3.4), que resultan clave para el orientar el desarrollo de la EMA-LHC a escala nacional en términos de la selección de nuevos paisajes de monitoreo. Estos aspectos diferenciales se trasladan a las variables del balance hidrológico que en consecuencia muestran variabilidad geográfica, a lo largo del gradiente altitudinal y en el ámbito regional. Para cada una de las principales variables se analizan y exponen estas características diferenciales (3.5). Las siguientes subsecciones incluyen los impactos antrópicos en ecosistemas de alta montaña (3.6), determinantes para el balance hídrico; las principales iniciativas de monitoreo hidroclimática y asociadas (3.7), y finalmente, los aspectos críticos identificados en la socialización de la EMA LHC (3.8) (Fundación IPC, SIÉ Ingeniería, CONDESAN, et al., 2023).

3.1. CONTEXTO LEGAL

Los instrumentos normativos que integra la EMA-LHC pueden agruparse en cuatro grandes categorías: i) La generación de conocimiento de los elementos del balance hidrológico y su relación con los ecosistemas, ii) el conocimiento y la protección de los ecosistemas estratégicos para la oferta hídrica, iii) el papel de las instituciones, y las comunidades en la gestión, conservación y restauración de dichos ecosistemas, y iv) los instrumentos para viabilizar los mecanismos de la gestión, conservación y restauración por parte de las instituciones y las comunidades.

En sus aspectos más generales la EMA-LHC se encuentra alineada con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) y con el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (PND). El PNGIRH tiene dentro de sus principales objetivos la conservación de los sistemas naturales de los que depende el recurso hídrico para el país, partiendo del entendimiento de cómo se relacionan los ecosistemas y los procesos hidrológicos.

En cuanto al conocimiento y la protección de ecosistemas estratégicos, la EMA-LHC al enfocarse en ecosistemas altoandinos, es consistente con el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 que plantea una actualización del PNGIRH en la dimensión de oferta hídrica, orientada a la protección de páramos y

humedales. Esta política ya cuenta con un hito normativo a través de la ley 1930 de 2018 (MADS) también conocida como ley de páramos.

Dado que la generación de conocimiento, la gestión y conservación de estos ecosistemas estratégicos debe apoyarse en instituciones como las Corporaciones Autónomas Regionales, las entidades administradoras de las áreas protegidas y los actores locales. La EMA-LHC, incluye estrategias que la integran con el Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC (MADS, Resolución 1454 de 2013), con los planes de manejo de los complejos de páramos, y con la participación de las comunidades locales a los que hace alusión la resolución 886 de 2018 (MADS), que se refrendan con los planes de contención a la deforestación, y los procesos de monitoreo y restauración participativa de ecosistemas, áreas protegidas y otras áreas ambientalmente estratégicas contemplados en el PND 2022-2026.

Finalmente, la EMA-LHC como guía para la estimación de la oferta hídrica, y de los impactos que en ella tienen los cambios en las coberturas de los suelos, pretende dar apoyo a las estrategias de pago por servicios ambientales (PSA) promovidas en el marco de los acuerdos de paz y reglamentada por el decreto 870 de 2017 (MADS). En este sentido también cobran relevancia la reglamentación asociada a la restitución de tierras que busca entre otros, vincular al habitante tradicional de la alta montaña mediante el desarrollo de nuevas alternativas económicas para la generación de ingresos que permitan, con eficacia y celeridad, frenar la transformación ambiental y la pérdida del capital natural del país.

3.2.CONTEXTO DE LA EMA

La Estrategia para el Monitoreo Integrado de Ecosistemas de Alta Montaña (EMA) es un instrumento para la integración de los sistemas de monitoreo existentes en la región de alta montaña en Colombia, que permite analizar la dinámica de sus ecosistemas ante diferentes factores como las dinámicas sociales y económicas, y el cambio climático. La EMA busca recopilar, sintetizar, generar y analizar de forma integrada información ambiental y social que oriente los esfuerzos para hacer frente a impactos antrópicos y climáticos, facilitando a su vez la gestión de la conservación de la alta montaña como espacio clave para la sociedad colombiana (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

El enfoque particular sobre los ecosistemas de alta montaña, se basa en varias de sus características clave:

- Estos espacios constituyen un hotspot global de biodiversidad.
- Se encuentran ubicados en la región de mayor concentración poblacional del país.
- Proveen servicios ecosistémicos valiosos para la población rural y urbana como la oferta, la regulación, y la calidad del recurso hídrico.
- Presentan alta vulnerabilidad y exposición frente al cambio climático (IDEAM et al., 2018).
- En estas zonas, nacen las fuentes de agua que abastecen aproximadamente al 70% de la población colombiana (Rivera & Rodríguez, 2011).

A la fecha de elaboración de este documento se han finalizado 3 proyectos que desarrollan objetivos de la EMA. A escala nacional, se cuenta con el Protocolo de Monitoreo Integrado y Participativo de la Alta Montaña (PMIP-AM) (IDEAM, 2022b), y el Primer Reporte Nacional sobre el Estado y Tendencia de la Alta Montaña en Colombia (RET-AM) (IDEAM, 2022a). El PMIP-AM presenta lineamientos para la participación comunitaria, y procedimientos posibles para tomar datos en cada área temática de la EMA, mientras el RET-AM entrega un consolidado de la información de monitoreo disponible en las diferentes áreas de la EMA a escala nacional.

A escala de paisaje se realizó un ejercicio piloto, denominado Reporte de Estado y Dinámica de los Sistemas Ecológicos y Sociales de la Cuenca de Río Claro (RED -Río Claro), que desarrolló uno de los objetivos clave de la EMA, al evaluar el estado y dinámicas de cambio, en variables, indicadores y servicios ecosistémicos dentro del paisaje de alta montaña de la cuenca de Río Claro, que incluye una franja del complejo de páramos de Los Nevados, y del PNN Los Nevados. Río Claro fue escogida para el piloto por ser un área emblemática en el contexto nacional, ya que cuenta con múltiples iniciativas de monitoreo e investigación.

En este primer Reporte de Estado y Dinámicas se identificaron dos factores principales que generan impactos en un alto número de las variables respuesta: el cambio climático y las actividades pecuarias. Los efectos del cambio climático se evidenciaron más claramente en la franja altitudinal de mayor elevación en el ADE (donde la intervención antrópica es mínima) que coincide con el área del PNN los Nevados en la cuenca. En la parte baja, se determinaron dinámicas marcadas de cambio de la oferta hídrica, de transformación de coberturas y de pérdida de capacidad de almacenamiento de carbono (SIÉ Ingeniería et al., 2023). En el estudio se identificó como prioritario el análisis más detallado de los factores que influyen en dos de los servicios ecosistémicos más importantes de la alta montaña, como lo son la oferta y la regulación hidrológica, para lo que se planteó la posibilidad de la implementación de un modelo hidrológico distribuido. De esta forma se podrían alcanzar objetivos más complejos de la EMA, que implican establecer relaciones entre servicios ecosistémicos y factores como los cambios en los usos y coberturas del suelo, la variabilidad climática y el cambio climático. La necesidad de estos análisis se fundamenta en los procesos evidenciados en el RED Río Claro y en el RET-AM de deforestación, incremento de la actividad ganadera, reducción de humedales y caudales, pérdida de área del glaciar y aumento de temperaturas.

A partir de la identificación de esta necesidad, se planteó profundizar la implementación de la EMA a través de la formulación de los lineamientos para un sistema integrado de monitoreo hidroclimático (EMA-LHC) que permita el desarrollo de objetivos como la investigación del impacto de los principales factores moduladores de los procesos de transformación sobre la oferta y la regulación hídrica, y la efectividad de políticas, medidas de manejo y gestión en la alta montaña.

A estos lineamientos se integra el enfoque del monitoreo participativo, como una herramienta clave para vincular a las comunidades en el marco de las estrategias, políticas ambientales y esquemas de gobernanza territorial orientadas a los procesos de educación ambiental, adaptación al cambio climático, y conservación y restauración de los ecosistemas de alta montaña.

Se espera que estos lineamientos sean de utilidad en otros paisajes de alta montaña que se propongan objetivos asociados a la componente hidroclimática. De dichos ejercicios, habrán de surgir suplementos o versiones ampliadas de esta primera entrega de la EMA-LHC, particularmente en los aspectos que no pudieron desarrollarse en el piloto de Río Claro, por ejemplo, el monitoreo comunitario y de variables para las que no se tiene información como precipitación horizontal y flujos subterráneos.

3.3. CLASIFICACIÓN BIOGEOGRÁFICA DE ECOSISTEMAS DE PÁRAMO EN COLOMBIA

La EMA establece un límite inferior de 2800 m s.n.m para los ecosistemas de alta montaña en Colombia correspondiente a la zona influenciada por los glaciares originados en Pleistoceno que incluye cumbres nivales, periglaciares, páramos, una serie de bosques altoandinos y matorrales, y en ocasiones el límite superior de bosques de niebla, robledales y bosques secos montanos (IDEAM et al., 2018).

Este referente no tiene implicaciones normativas, o un alcance ecológico estricto y solo debe entenderse como una guía geográfica para el establecimiento de programas de monitoreo que siguen el enfoque de la EMA. A escala 1:100.000 la región sobre los 2800 m s.n.m cubre una superficie de 4.125.500 ha, equivalente al 3,6% del área continental de Colombia (IDEAM et al., 2018), de las cuales 2.906.137 ha (70 %) corresponden a las áreas delimitadas de páramos (C. Sarmiento et al., 2013, 2017).

En el país los trabajos realizados para clasificar la alta montaña desde una perspectiva biogeográfica se han enfocado en las regiones de páramo, enfatizando temas como clima, suelos, biodiversidad, endemismos y fisonomía de la vegetación. Uno de los mejores referentes que se tienen corresponde al Atlas de Páramos de Colombia (Morales et al., 2007), que partió de la propuesta de unidades biogeográficas en Colombia (J. Hernández et al., 1992). En el Atlas, las unidades aparecen jerarquizadas en 5 sectores, 15 distritos y 34 complejos de páramos, los sectores incluyen varios distritos, y estos a su vez varios complejos. Las diferencias entre sectores están relacionadas con el aislamiento geográfico ocasionado por la separación entre valles interandinos y las distintas cordilleras. Por su parte, las diferencias entre los distritos se presentan en cuanto a las especies (composición de especies, presencia de especies endémicas, coincidencia de los límites de las distribuciones de especies) y relaciones de cambios históricos. Siguiendo con la escala de clasificación, en un nivel más detallado se encuentran los complejos que varían de acuerdo al contexto biofísico local de cada distrito. En el año 2013, se presentó una actualización de la cartografía de los complejos de páramos, teniendo en cuenta contribuciones interdisciplinarias, donde se integran aspectos sociales y de transformación del territorio (Cortés & Sarmiento, 2013; Rivera & Rodríguez, 2011). En esta actualización se agregaron dos nuevos complejos, y se aumentó el área delimitada de páramos en un 47% llegando a su actual valor de 2.906.137 ha. (Morales et al., 2007), de las cuales el 45% se encuentra bajo alguna de las categorías del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (García, 2018). La Tabla 1 presenta la clasificación de los complejos de páramo, y los distritos y sectores a los que pertenecen.

Como se ve en la tabla, la categoría general de sectores coincide con las tres cadenas montañosas más importantes de Colombia, el relieve periférico de la Sierra Nevada de Santa Marta, y el Nudo de los Pastos. En esta categoría se resalta el papel de las barreras montañosas que modifican las condiciones meso y ecoclimáticas, especialmente la precipitación.

Entre estos sectores, el de la Sierra Nevada de Santa Marta presenta el mayor aislamiento y las cumbres más elevadas, como los picos nevados Cristóbal Colón y Simón Bolívar con alturas de 5.775 y 5.560 m s.n.m respectivamente. Al sur del país, en el nudo de Los Pastos, la Cordillera de los Andes se bifurca en dos ramales. Del primero nace la Cordillera Occidental aislada por el valle del Río Cauca. Esta cordillera es la de menor altura (< 4200 m.s.n.m) y por ello cuenta con áreas relativamente pequeñas y poco conectadas de páramo. El segundo ramal se prolonga hacia el nororiente y forma el Macizo Colombiano entre los departamentos del Cauca y Huila donde nacen los ríos Cauca, Magdalena, Putumayo, Caquetá y Patía, allí ocurre una nueva bifurcación que da origen a las Cordilleras Central y Oriental (Morales et al., 2007).

La Cordillera Central es de origen volcánico, presentando en sus partes más altas volcanes nevados como los del Ruiz (5.400 m), Tolima (5.200 m), Santa Isabel (4.920 m) y Huila (5.631 m); cuenta con una importante conectividad de páramos de norte a sur y se encuentra aislada por el valle del Río Magdalena de la Cordillera Oriental, en donde los ecosistemas de páramo presentan menor conectividad pareciéndose más a “islas” entre los bosques montañosos. En esta cordillera se encuentra el altiplano cundiboyacense, el sector glacial de la Sierra Nevada del Cocuy y el Nudo de Santurbán (Morales et al., 2007).

| Sector | Distrito | Complejo | Total (ha) |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|
| Cordillera Central | Belmira-Santa Inés | Belmira-Santa Inés | 10.622 |
| | Macizo Colombiano | Guanacas-Puracé-Coconucos | 137.677 |
| | | Sotará | 80.929 |
| | Sonsón | Sonsón | 8.707 |
| | Valle-Tolima | Las Hermosas | 208.011 |
| | | Nevado del Huila-Moras | 150.538 |
| | Viejo Caldas-Tolima | Chilí-Barrangán | 80.708 |
| Los Nevadas | | 146.027 | |
| Cordillera Occidental | Duende-Cerro Plateado | Cerro Plateado | 17.070 |
| | | El Duende | 4.454 |
| | | Farallones de Cali | 4.545 |
| | Frontino-Tatamá | Citará | 11.233 |
| | | Frontino-Urrao | 13.921 |
| | | Tatamá | 10.930 |
| | Paramillo | Paramillo | 6.744 |
| Altiplano | Altiplano Cundiboyacense | 4.657 | |
| Cordillera Oriental | Boyacá | Guantiva-La Rusia | 119.750 |
| | | Iquaque-Merchán | 28.311 |
| | | Pisba | 106.243 |
| | | Sierra Nevada del Cocuy | 271.033 |
| | | Tota-Bijagual-Mamapacha | 151.498 |
| | Cundinamarca | Chingaza | 109.956 |
| | | Cruz Verde-Sumapaz | 333.420 |
| | | Guerrero | 42.325 |
| | | Rabanal y Río Bogotá | 24.650 |
| | Los Picachos | Los Picachos | 23.725 |
| | Miraflores | Miraflores | 19.928 |
| | Perijá | Perijá | 29.723 |
| | Santanderes | Almorzadero | 156.552 |
| Jurisdicciones-Santurbán-Berlín | | 142.608 | |
| Tamá | | 16.339 | |
| Yariguíes | | 4.252 | |
| Nariño-Putumayo | Nariño-Putumayo | Chiles-Cumbal | 63.223 |
| | | Doña Juana-Chimayoy-Juanay | 69.263 |
| | | La Cocha-Patascay | 145.539 |
| Sierra Nevada de Santa Marta | Santa Marta | Sierra Nevada de Santa Marta | 151.021 |
| Total general | | | 2906.132 |

Tabla 1. Clasificación biogeográfica de los páramos en Colombia

Fuente: (Morales et al., 2007)

3.4. CLASIFICACIÓN BIOGEOFÍSICA Y DE COBERTURAS DE ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA

Por su importancia general, los ecosistemas de alta montaña han sido estudiados y caracterizados de manera amplia, desde múltiples enfoques y disciplinas. Para este documento se priorizan los enfoques biogeofísico y de coberturas del suelo, ambos de alta relevancia desde el punto de vista hidrológico.

El enfoque biogeofísico incluye dos grandes grupos: las unidades morfogénicas y las franjas o zonas de vida paramunas. Ambos están estrechamente relacionados y recogen las principales diferencias climáticas, bióticas y geomorfológicas de la alta montaña por lo que son claves para orientar programas de monitoreo

que den cuenta de la diversidad hidrológica a lo largo del gradiente altitudinal en los aspectos que los hacen relevantes para sus funciones de oferta y regulación hídrica (sección 2.3).

En la siguiente subsección se abordan algunos detalles de la caracterización morfogénica ya que ofrece un contexto claro para la presentación de las principales diferencias que se observan en las formaciones superficiales y los suelos de la alta montaña en términos de sus características reguladoras de la oferta hídrica. Las unidades morfogénicas y la variación climática en el gradiente altitudinal sustentan a su vez la diversidad ecológica y de coberturas, de las que dependen procesos del ciclo hidrológico como la intercepción de la precipitación y la niebla, la infiltración y la evapotranspiración. La caracterización desde el punto de vista de coberturas, tiene su principal utilidad por la conexión con variables y parámetros del balance hídrico, que también posibilitan el uso de modelos hidrológicos distribuidos.

3.4.1. Morfogénesis de la alta montaña

Los glaciares no son masas estáticas de hielo y nieve, al contrario, tienen un flujo y dinámicas que impactan el relieve con el que interactúan en dos formas generales: suavizándolo a través de procesos como la abrasión y la gelifración, y dando lugar a geoformas típicas producto de procesos erosivos y del arrastre y acumulación de materiales de diversos tamaños. Los procesos erosivos glaciares nivelan el terreno, pero también realzan algunas de las características topográficas preexistentes configurando modelados típicos como los circos glaciares, y depresiones en formas cóncavas, importantes en la formación de zonas de acumulación de agua como lagunas, luego de los periodos de retroceso glaciar.

La alta montaña se ha dividido geomorfológicamente en cuatro unidades morfogénicas que de arriba hacia abajo son: Glaciar (MAG), Periglaciar (MAP), Modelado Glaciar Heredado (MAH), y Modelado Periglaciar Heredado (MAI). Esta división se realiza teniendo en cuenta las condiciones estructurales orogénicas, los impactos heredados de la máxima extensión y retrocesos del proceso glaciar durante el Pleistoceno (35000 años atrás), el retroceso Neoglacial (1850 D.C.), y el clima actual. La descripción de las unidades se construyó a partir de la información recopilada en los documentos: “Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot y Global Climatic Tensor”, capítulo 4 (IDEAM, 2002), “Sistemas morfogénicos del territorio colombiano”, capítulo 2 (IDEAM, 2010b), y “Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia” (Rivera & Rodríguez, 2011). Estas unidades, como se expondrá, son determinantes para la conformación de las franjas ecológicas (sección 3.4.2), en las que aparecen comunidades vegetales y de suelos que cambian a medida que se avanza en por el gradiente altitudinal.

Unidad Glaciar (MAG)

Corresponde a los relictos de la última glaciación en proceso de retroceso debido a la fusión acelerada que produce el calentamiento atmosférico. Están formados por hielo mezclado parcialmente con detritos rocosos heterométricos. Se ubican en los espacios culminantes de las montañas por encima de los 4800 m s.n.m. Climáticamente este piso está definido en su límite inferior por la isoterma media anual de los 0°C, aunque el borde inferior de los glaciares está ligeramente más arriba. Actualmente solo persisten en Colombia 6 regiones glaciares, la de los volcanes nevados del Tolima, Huila, Ruiz y Santa Isabel, y las de las sierras nevadas del Cocuy y Santa Marta. Todos estos nevados desaparecerían en las próximas décadas.

Hidrológicamente el proceso más notorio del piso glaciar es la fusión, que puede darse en su superficie, en el contacto con el sustrato rocoso producto de una ligera diferencia de temperaturas y de la presión de la capa de hielo (fusión subglaciar), y finalmente en el perímetro glaciar en su límite inferior. Los glaciares tienen una oferta hídrica alta por unidad de área, pero resultan más bien bajas en contexto, puesto que el área de los nevados colombianos es del 2% al 5% del área total de una cuenca hidrográfica típica de alta montaña

(Ceballos, 2012). Otros procesos de interés hidrológico de los glaciares menos estudiados son el aporte a las aguas subterráneas, y el papel en la regulación del clima local y regional.

Unidad Periglaciaria (MAp)

Como piso morfológico comprende la región entre el límite inferior de los glaciares (cuando existen) y los 4100 ± 100 m de altitud; incluye los espacios de los nevados que por sus altas pendientes están desprovistos de hielo (afloramientos rocosos). Desde el punto de vista cronológico corresponde a un área que abarca principalmente los espacios liberados del hielo luego del período denominado Pequeña Edad Glacial o Neoglacial transcurrido desde comienzos del siglo XVII y hasta mediados del XIX cuando los nevados en Colombia se recuperaron levemente y descendieron en promedio hasta los 4300 m de altitud. Después de este período empezó un proceso de retroceso glaciario que liberó los detritos rocosos, y los depositó superficialmente formando en ocasiones pequeños arcos morrénicos. Así el periglaciario actual incorpora los efectos de modelado de la última glaciación transcurrida en Pleistoceno, y el reciente período Neoglacial.

Climáticamente el periglaciario se ubica entre las isoteremas anuales de 0°C y 4.5 °C. Debido a las limitantes térmicas, la unidad está prácticamente desprovista de vegetación, y solo se observa un proceso de fitocolonización incipiente en la parte inferior con especies pioneras de páramo. El desarrollo de los suelos periglaciares también es exiguo, producto de la escasa vegetación y del arrastre de materiales finos causado por los fuertes vientos (deflación) y por el escurrimiento superficial derivado de la lluvia y de procesos típicos en la unidad como la fusión del hielo y la fusión de la nieve en los ciclos térmicos diurno/nocturno. En lugar de suelos estables se tienen delgadas coberturas superficiales de material gravilloso que el viento y el escurrimiento superficial no logra movilizar.

Los materiales finos transportados en esta unidad también pueden acumularse en las depresiones expuestas por el retiro del glaciar, o causadas por otros procesos morfogénicos del periglaciario como la sufusión y la soliflucción. Es así como las pequeñas lagunas proglaciares suelen colmatarse en períodos cortos por el arrastre y la acumulación de sedimentos. Las demás formaciones superficiales del periglaciario son análogas a las de la siguiente unidad morfogénica, ya que se obtienen de los mismos procesos de modelado derivados de la dinámica glaciaria.

Algunos autores han denominado a esta unidad como desiertos de altitud, debido a la exigua protección de la vegetación casi inexistente, la acción secante (altas tasas de evaporación) producida por los fuertes vientos, la incidencia directa de la radiación sobre el suelo, y la amplia oscilación térmica diaria.

Modelado glaciario heredado (MAh)

Se refiere al área definida por la mayor extensión del hielo durante la última glaciación, y cuyos glaciares descendieron hasta altitudes de 3000 ± 100 m. Para separarlo de la unidad periglaciaria actual (MAp), se le asigna un límite superior de 3800 ± 100 m de altitud. La unidad se caracteriza por un paisaje de pendientes atenuadas por la acción abrasiva del flujo glaciario, y la presencia de un gran número de lagunas, pantanos y depósitos de turberas, en las cubetas de sobreexcavación y depresiones que quedaron descubiertas al derretirse las masas glaciares. En los valles de fondo, las lenguas glaciares dejaron depósitos heterométricos organizados en morrenas de fondo, laterales y frontales, además de un modelado de rocas cepilladas y aborregadas.

Climáticamente la unidad se ubica entre las isoteremas anuales de 11°C a 4.5°C. Las condiciones térmicas menos extremas brindaron mejores condiciones para una colonización efectiva de especies vegetales de porte bajo. La vegetación a su vez ofreció una barrera de protección mecánica contra el viento y el

escurrimiento que evitó la colmatación de las lagunas y permitió la consolidación de los suelos que lograron así mayores espesores, siendo más significativos en las zonas con actividad volcánica debido al aporte de materiales piroclásticos.

Desde el punto de vista hidrológico las más de 1500 lagunas en la unidad constituyen una notable reserva hídrica. Además los suelos tienen una importante capacidad de infiltración y almacenamiento de agua producto de factores como: i) capas con buena capacidad de infiltración/retención de agua por una combinación de formaciones superficiales de grava mezclada con materiales finos en ocasiones de origen volcánico, ii) presencia de varios niveles de suelo (por ejemplo dos horizontes tipo A intercalados con horizontes de grava) producto de ciclos de avance y retroceso glacial y iii) capas de ceniza, lapilli y otros materiales en zonas con actividad volcánica.

Esta unidad ha sido objeto de procesos de expansión de la frontera agrícola con consecuencias negativas en su capacidad de regulación hídrica, que se profundizaron en la sección 3.6.

Modelado Periglacial Heredado o Montaña Altandina Inestable (MAi)

Se refiere a la unidad morfológica comprendida entre los 2700 ± 100 m de altitud y el límite inferior de la unidad de glaciario heredado. Esta región corresponde aproximadamente al espacio periglaciario de la última glaciación. Al tratarse de una región que no estuvo cubierta por el hielo, no se presentaron los efectos de suavización del relieve, por lo que se conservaron sus fuertes pendientes, agudizadas en cañones en donde convergen las corrientes de agua provenientes de las unidades superiores. Sin embargo, la unidad si tuvo afectación por procesos periglaciares, tales como reptación por crioturberación, crioclastia, nevadas frecuentes, escurrimiento superficial por fusión del hielo y gelifracción que dieron lugar a los depósitos de materiales heterométricos no consolidados y depósitos de roca suelta al pie de relieves escarpados donde con frecuencia se observan resurgencias de agua.

Las mayores temperaturas, permitieron el desarrollo de vegetación de mayor altura conocida regularmente como bosque altoandino o selva húmeda, debido a la presencia de grandes frentes de condensación. Las formaciones superficiales dominantes son los afloramientos rocosos y los suelos con poco desarrollo, ya que, por las elevadas pendientes, el escurrimiento superficial remueve fácilmente las pequeñas formaciones resultantes de los procesos de meteorización.

Históricamente la unidad ha sido objeto de colonización agrícola con la consecuente destrucción de la vegetación y mayor degradación de los suelos. Son comunes en esta región los procesos erosivos, de remoción en masa, y modelados acentuados por las actividades antrópicas como surcos de cultivos y terracetas por el pisoteo del ganado.

3.4.2. Franjas altitudinales o zonas de vida paramuna

Las variaciones de la temperatura, la precipitación y morfogénesis en un gradiente montañoso favorecen la segregación ecológica que se expresa en franjas o zonas de vegetación. En los ecosistemas de alta montaña se reconocen cuatro grandes franjas altitudinales o zonas de vida paramuna estrechamente relacionadas con las unidades morfogénicas descritas en la sección anterior. Estas franjas son de arriba hacia abajo: i) el superpáramo, ii) el páramo propiamente dicho, iii) el subpáramo o páramo bajo y iv) el bosque altoandino (Rivera & Rodríguez, 2011).

Cuando las transiciones entre las franjas de bosque altoandino y páramo están bien definidas se habla de ecotonos, pero este no es siempre el caso. En ocasiones se observan transiciones graduales en la vegetación

y se habla de ecoclinas. La Figura 3 sintetiza las relaciones entre el modelado glaciar y las franjas altitudinales en regiones de alta montaña.

A continuación, se describen brevemente cada una de las franjas con las alturas de referencia tomadas de la EMA (IDEAM et al., 2018) y la Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia (Rivera & Rodríguez, 2011). Las elevaciones pueden variar a nivel nacional entre sectores y vertientes (húmedas y secas), y a nivel regional entre complejos.

Franja de Superpáramo

Se sitúa por encima de los 4100 m.s.n.m, y corresponde aproximadamente con el ambiente periglacial (MAp) caracterizado por amplias superficies de rocas y fragmentos de roca desnuda con poca vegetación, la cual aparece principalmente en la parte inferior, siendo el tipo fisionómico más común el de vegetación de tipo prado dominada por hierbas, gramíneas dispersas, cojines y rosetas pequeñas.

Franja de Páramo

Se sitúa entre los 3500 y 4100 m.s.n.m. La diversificación comunitaria es máxima, albergando varios tipos de vegetación, con predominio de frailejonales o rosetas caulescentes (con especies de *Espeletia*), pajonales (con especies de *Calamagrostis*) y chuscales de *Chusquea tessellata* principalmente.

Franja de subpáramo o páramo bajo

Se sitúa entre los 3200 y 3600 m.s.n.m. Se caracteriza por la vegetación arbustiva predominante, matorrales dominados por especies de *Diplostephium*, *Pentacalia* y *Gynoxys* (Asteraceae), *Hypericum* (*H. laricifolium*, *H. ruscoides*, *H. juniperinum*), *Pernettya*, *Vaccinium*, *Bejaria* y *Gaultheria* (Ericaceae). En casi todas las localidades se presentan zonas de ecotonía o de contacto con la vegetación de la región de la franja Altoandina y se conforman comunidades mixtas. Junto con el páramo, corresponde aproximadamente a la unidad MAh, o modelado glaciar heredado.

Franja Bosque Altoandino

Constituye una zona de ecotonía entre la vegetación cerrada de bosques o selva húmeda de montaña y la vegetación abierta de matorrales y pajonales de la parte alta, ubicada entre los 3000 y 3200 m.s.n.m. Las comunidades incluyen bosques altos dominados por especies de *Weinmannia* (encenillos) y *Hesperomeles* (mortiños), entre otros tipos de vegetación. Como se mencionó para la unidad morfológica MAi, esta franja es la de mayor colonización y por lo tanto de mayor transformación en las coberturas naturales por zonas agrícolas y pastizales para ganado, con su correspondiente impacto hidrológico.

Fig3

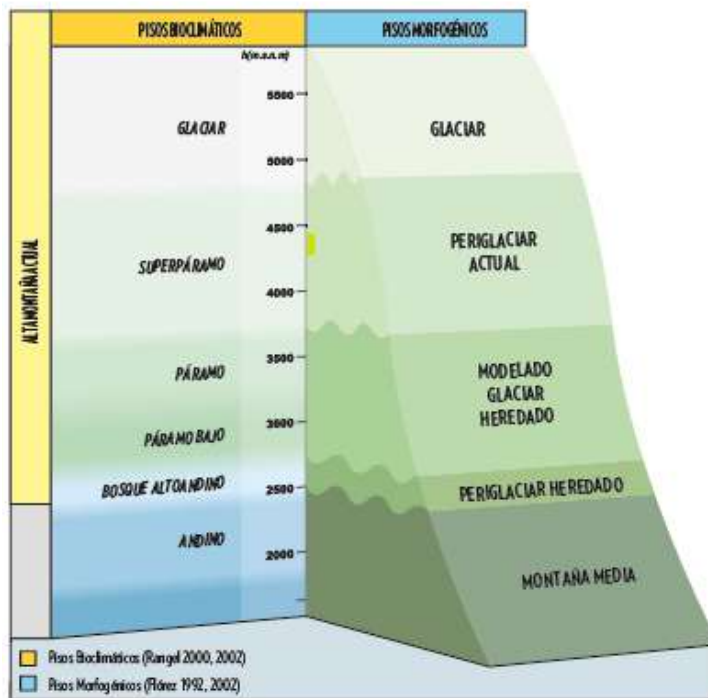


Figura 3. Franjas de gradiente altitudinal y pisos morfogénicos

Fuente: Guía divulgativa delimitación de páramos (Rivera & Rodríguez, 2011)

Aunque no pueden clasificarse como franjas específicas, existen otros ecosistemas diferenciales importantes en la alta montaña como: los páramos azonales, las zonas paramizadas, los agroecosistemas y las áreas húmedas como lagos, humedales, pantanos y turberas. Estas últimas se presentan con más detalle en la sección 3.5.10, las demás se describen a continuación (Rivera & Rodríguez, 2011).

Paramos azonales y zonas paramizadas

Ocasionalmente, los paisajes de alta montaña presentan singularidades en sus franjas, dos de las más importantes son los páramos azonales, y las zonas paramizadas. Un páramo azonal corresponde a una región con vegetación paramuna que se desarrolla fuera de las condiciones climáticas y edáficas dominantes. Generalmente se presenta a menor altitud en crestas de montaña o en el fondo de valles.

Entre tanto, las zonas paramizadas, son regiones generalmente de pastos o utilizados para cultivos, que, al ser abandonadas las actividades productivas, fueron colonizadas por especies de páramo. A diferencia de los páramos azonales, las zonas paramizadas estuvieron cubiertas por coberturas boscosas que fueron removidas por disturbios, por ejemplo, de origen antrópico para desarrollo de actividades productivas, pero las condiciones ambientales hicieron más favorable la sustitución por coberturas de páramos secundarios, que, por sus coberturas originales, de lento crecimiento a estas altitudes (Llambí, 2015)

Agroecosistemas

Los agroecosistemas son áreas intervenidas antrópicamente, donde pueden presentarse de manera individual o mezcladas, unidades de pastos asociados a ganadería, y cultivos que para el caso de la alta montaña puede incluir papa, maíz, leguminosas entre otras (IDEAM, 2002). Las dinámicas de uso pueden seguir ciclos como el presentado en la Figura 4.



Figura 4. Ciclo general de manejo en los suelos paramunos

Fuente: Guía divulgativa delimitación de páramos (Rivera & Rodríguez, 2011)

3.4.3. Coberturas de los ecosistemas de alta montaña

De acuerdo al Mapa de Ecosistemas de Colombia (IDEAM 2017), la zona de alta montaña incluye mosaicos de bosques, páramos, herbazales, turberas, humedales, pantanos, glaciares, unidades de vegetación secundaria y agroecosistemas (IDEAM et al., 2018). Esta clasificación corresponde a la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, que sigue la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000 (IDEAM, 2010c). Esta leyenda fue estructurada de manera jerárquica con 6 niveles, los niveles 1 y 2 son idénticos a los de la leyenda Corine Land Cover de Europa. En el nivel 1 se tienen las categorías generales: 1. Territorios artificializados, 2. Territorios agrícolas, 3. Bosques y áreas seminaturales, 4. Áreas Húmedas y 5. Superficies de Agua. Los Territorios Artificializados (1) y los Territorios Agrícolas (2) aplican para áreas de alta montaña intervenidas antrópicamente, los primeros incluyen las zonas urbanizadas continuas y discontinuas, las regiones con actividad industrial y minera, y la infraestructura vial; los segundos incluyen coberturas de pastos (asociadas generalmente a la ganadería), cultivos específicos como el de papa, cultivos mixtos de la categoría de mosaicos de cultivos, combinaciones entre diferentes territorios agrícolas, y entre territorios agrícolas y diferentes coberturas naturales, secundarias o plantadas. Las Superficies de Agua (5) corresponden a los ríos, lagos, lagunas y cuerpos de agua artificiales. Las categorías de Bosques y Áreas Seminaturales (3), y Áreas Húmedas (4) comprenden a la mayor parte de las coberturas de alta montaña y se describen con mayor detalle en la Tabla 2 tomando como referencia las definiciones de Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra (IDEAM, 2010c).

3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES

3.1 BOSQUES: coberturas de plantas leñosas perennes con un solo tronco principal, que tienen una copa más o menos definida con altura del dosel superior a 5 metros. Estos a su vez se clasifican en categorías que dependen de la densidad de la cobertura y de la altura. Una cobertura se considera densa cuando ocupa un porcentaje superior al 70% de la unidad (25 ha para la escala 1:100.000) y se considera abierta cuando ocupa un porcentaje entre el 30% y el 70% de la unidad. En este último caso la mayoría de las copas de los árboles no se tocan. Respecto a la altura, se consideran bosques bajos, aquellos con altura de dosel entre 5 m y 15 m, y bosques altos aquellos con alturas que superan los 15 m. En ecosistemas de alta montaña las zonas boscosas se encuentran en los ecosistemas altoandinos y en sus transiciones o límites con los ecosistemas de páramo. Los bosques densos y altos se ubican en las partes más bajas, y van reduciendo su altura y haciéndose abiertos a medida que se avanza por el gradiente altitudinal hacia los ecosistemas de páramo.

3.1.4 Bosque de galería y ripario: Se refiere a las coberturas constituidas por vegetación arbórea ubicada en las márgenes de cursos de agua permanentes o temporales.

3.2 ÁREAS CON VEGETACIÓN HERBÁCEA O ARBUSTIVA: Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo.

3.2.1 Herbazales: comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos. Una hierba es una planta no lignificada o apenas lignificada, de manera que tiene consistencia blanda en todos sus órganos, tanto subterráneos como epigeos. Al igual que los bosques pueden ser densos o abiertos, pero para la alta montaña también resulta importante la condiciones de inundabilidad de los suelos por lo que pueden clasificarse en inundables o de tierra firme. Los herbazales densos son más frecuentes en las transiciones de bosques altoandino a páramo, y también van haciéndose abiertos a medida que aumenta la altitud. Los herbazales inundables se ubican en páramos muy húmedos, en zonas pantanosas y cerca a lagunas, compartiendo generalmente el espacio con turberas, un tipo de cobertura que se describe más adelante. Dependiendo del tipo de suelos también pueden encontrarse herbazales rocosos y arenosos.

3.2.2 Arbustales: Comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos. Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo leñoso, con una altura entre 0,5 y 5 m, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida. Para los ecosistemas de alta montaña también pueden clasificarse en denso o abiertos, siguiendo los patrones ya descritos para el herbazal.

3.2.3.2 Vegetación secundaria: Comprende aquella cobertura vegetal originada por el proceso de sucesión de la vegetación natural que se presenta luego de la intervención o por la destrucción de la vegetación primaria, en áreas agrícolas abandonadas y en zonas donde por la ocurrencia de eventos naturales la vegetación natural fue destruida.

3.3 ÁREAS ABIERTAS SIN O CON POCA VEGETACIÓN: Comprende aquellos territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesta principalmente por suelos desnudos, algunos de los cuales pueden estar cubiertos por hielo y nieve

3.3.2 Afloramientos rocosos: áreas en las cuales la superficie del terreno está constituida por capas de rocas expuestas, sin desarrollo de vegetación, generalmente dispuestas en laderas abruptas.

3.3.3 Tierras desnudas y degradadas: superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extrema.

3.3.5.1 Zonas glaciares: Áreas cubiertas por hielo en forma permanente. La cobertura de hielo se localiza en la cima y algunas laderas de las montañas más altas del sistema andino colombiano, por encima de la cota de nivel de 4.900 msnm.

3.3.5.2 Zonas nivales: se presentan por encima de la cota de nivel de 4.200 msnm, como resultado de la ocurrencia de nevadas, pueden cubrir grandes extensiones de la alta montaña, su cobertura permanece unos pocos días.

4 ÁREAS HÚMEDAS

4.1 ÁREAS HÚMEDAS CONTINENTALES: Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos anegadizos en los cuales el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente.

4.1.1 Zonas pantanosas: Esta cobertura comprende las tierras que permanecen inundadas la mayor parte del año, pueden estar constituidas por zonas de depresiones naturales donde la capa freática aflora de manera permanente o estacional

4.1.2 Turberas Son terrenos de tipo pantanoso, de textura esponjosa, cuyo suelo está compuesto principalmente por musgos y materias vegetales descompuestas. Se encuentran en áreas andinas en terrenos situados por encima de los 3.200 msnm.

4.1.3 Vegetación acuática sobre cuerpos de agua Bajo esta categoría se clasifica toda aquella vegetación flotante que se encuentra establecida sobre cuerpos de agua, recubriéndolos en forma parcial o total.

Tabla 2. Principales coberturas naturales en la alta montaña de acuerdo a la Leyenda Nacional Corine Land Cover

Fuente:(IDEAM, 2010c)

De manera similar a como se mencionó para el caso de las coberturas de territorios agrícolas, las coberturas naturales pueden aparecer mezcladas entre sí configurando subcategorías más específicas como “herbazales densos de tierra firme con arbustos”.

Con referencia a la vegetación típica de la alta montaña no existe una correlación estricta con las leyendas Corine Land Cover para Colombia, pues no cuentan con categorías específicas para algunos tipos fisionómicos propios de páramo como chuscales, pajonales, rosetales o frailejonales (sección 3.5.6). Además, las zonas de vida o franjas altitudinales presentadas, pueden incluir vegetación de diferentes tipologías que dificultan la definición de categorías directas. A este respecto el Instituto Humboldt realizó una contribución para la generación de un mapa de coberturas de la tierra en páramos priorizados a escala 1:25000. El mapa incluye 21 de los 36 complejos de páramos del país (Instituto Humboldt, 2014), y define nuevas categorías para páramos como frailejonal, arbustal denso bajo, entre otros.

La Tabla 4 de la sección 3.5.6 presenta algunas de las relaciones principales entre tipos fisionómicos de alta montaña y tipologías de coberturas de acuerdo a la leyenda Corine Land Cover.

3.5.PRINCIPALES ASPECTOS DEL BALANCE HIDROLÓGICO EN ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA DE COLOMBIA

Con la clasificación biogeográfica, biogeofísica y de coberturas como marco de referencia, a continuación, se presentan los principales aspectos del balance hidrológico en la alta montaña, que incluyen variables como la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y la radiación solar; factores del medio natural como las coberturas glaciares, la vegetación y los suelos; y procesos relevantes para la alta montaña, como la interceptación, y los flujos subterráneos. Para la mayoría de estos aspectos se mencionan: i) las variables determinantes o asociadas, ii) la variabilidad espacial por sectores y a lo largo del gradiente altitudinal, iii) la variabilidad temporal, iv) su interés hidrológico y v) valores de referencia para las variables o parámetros de interés hidrológico. En las subsecciones se hace alusión a la nomenclatura de flujos y almacenamiento de la Figura 2 sección 2.2 para dar una mejor ubicación al lector.

Como se anticipó en la sección anterior, la interacción entre los procesos morfogénicos y el clima influyen la variabilidad a lo largo del gradiente altitudinal de aspectos del balance hídrico como la vegetación y los suelos. La temperatura se presenta como la variable más determinada por el gradiente altitudinal, mientras la precipitación tiene otras influencias. A escala nacional es importante el impacto de las masas húmedas sobre las vertientes de los sectores de alta montaña, y a escala local se destaca la influencia de la alta variabilidad de los vientos. El primer impacto influye variables como la humedad relativa, la interceptación, los suelos y la vegetación que dependen significativamente de las condiciones húmedas o secas de sus entornos. El impacto de los vientos se asocia a la alta variabilidad espacial de la precipitación y de la neblina. A estos factores naturales debe sumarse el impacto de las actividades antrópicas mucho más pronunciado en las franjas más bajas de bosque altoandino y subpáramo (sección 3.6). La variabilidad temporal de algunas variables se relacionó con los ciclos diurno y nocturno, y a escala anual con la influencia de la dinámica climática de la Zona de Convergencia Intertropical.

De las referencias utilizadas se resaltan varios documentos. “Ecología, Hidrología y Suelos de Páramo” (Llambí et al., 2012) es un texto introductorio de los principales conceptos del balance hídrico en alta montaña y las relaciones entre sus diferentes aspectos, logrando un balance entre rigor y claridad explicativa para el lector no especializado. A escala andina los textos “Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos?” (Hofstede et al., 2014), y “Hidrología del Páramo Importancia, Propiedades y Vulnerabilidad” (Buytaert, De Bièvre, et al., 2006),

ofrecen un buen marco para entendimiento de la diversidad de los aspectos hidrológicos en la alta montaña, y a nivel nacional hacen lo propio los textos “Definición de Criterios para la Delimitación de Páramos del País” (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010) y “Guía Divulgativa de Criterios para la Delimitación de Páramos de Colombia” (Rivera & Rodríguez, 2011). A escala de distritos y complejos de páramos, se recomienda los textos “Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor” (IDEAM, 2002), “Atlas de Paramos de Colombia” (Morales et al., 2007), y el informe “Coberturas de la tierra en los páramos priorizados” (Instituto Humboldt, 2014).

Para consultas con herramientas SIG, puede accederse directamente a la cartografía desde los geoportales y páginas institucionales. Variables como temperatura, precipitación y velocidad del viento están disponibles en el portal DHIME del IDEAM para diferentes periodos. Para cartografía de coberturas pueden consultarse el mapa de usos y coberturas del IDEAM y para los de complejos de páramos la delimitación elaborada por el Instituto Humboldt. En el caso de los suelos, la información cartográfica a escala 1:100000 puede descargarse del geoportal del IGAC. Como estudios de interés a mayor nivel de detalle (escala 1:25000) se destacan los mapas de cobertura de paramos (Instituto Humboldt, 2014) y los estudios de suelos en complejos de páramo a (IGAC, 2015).

La principal fuente de datos para la sección, fue el libro “Los Páramos de Colombia. Características Biofísicas, Ecohidrología y Cambio Climático” (Tobón, 2022), el cual consolida más de 20 años de investigaciones en ecosistemas de páramos, presentando los estudios más rigurosos y recientes en el País. El texto se configura en material imprescindible para los interesados en profundizar en el conocimiento de los ecosistemas de páramo colombianos.

3.5.1. Variabilidad de la temperatura

Debido a la localización de las zonas montañosas de Colombia cerca de la línea equinoccial que permite una cantidad de radiación solar diaria casi constante todo el año, las temperaturas no presentan variaciones considerables en sus promedios mensuales y anuales para un mismo punto. En contraste, la variabilidad del ciclo diario es amplia (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010). Mientras por la noche puede nevar o helar con temperaturas bajo cero, durante el día las temperaturas pueden elevarse en más de 20 °C (L. D. Llambí et al., 2012) aunque estudios más recientes, sugieren que esta variabilidad es menos drástica en Colombia (Tobón, 2022)

Especialmente la variabilidad de la temperatura en la alta montaña presenta una marcada correlación con la altitud, con una tasa de reducción entre 0.6 y 1 °C por cada 100 metros de incremento en la altura (R. Hofstede et al., 2014) y un valor de referencia promedio de 0.78 °C para Colombia (Tobón, 2022). La orientación de las cadenas montañosas también tiene un ligero impacto, siendo más cálidas las laderas orientadas hacia el este, por el efecto de la radiación (Llambí et al., 2012). A largo plazo el análisis de series de temperatura de más de treinta años en páramos de Cundinamarca, Boyacá, Tolima y Huila, mostraron incrementos de entre 0.3 y 0.4 °C en la temperatura media por década (IDEAM, 2002).

Con relación al gradiente altitudinal, en la transición entre el bosque altoandino y el subpáramo, las temperaturas medias multianuales son inferiores a 9 °C. En el páramo medio o propiamente dicho, éstas corresponden a valores inferiores a 6 °C, mientras que, en el superpáramo, los valores se presentan por debajo de los 3 °C (Morales et al., 2007).

3.5.2. Variabilidad de la precipitación

A diferencia de la temperatura, la precipitación [E1] en la alta montaña presenta una alta variabilidad espacial y temporal. A nivel de sectores, la variabilidad depende de grandes rasgos de la dirección de los vientos y del contenido de humedad de las masas de aire que llegan a los sistemas montañosos. En general las vertientes por donde sopla el viento (barlovento) son más lluviosas debido a que allí el aire asciende, se enfría y condensa la humedad dando lugar a nubes con alto potencial de precipitación, mientras en el costado contrario se produce el efecto denominado sombra de lluvia, donde el aire descargado de humedad desciende y aumenta de temperatura, reduciendo la posibilidad de lluvias. En cuanto al contenido de humedad del aire, este es mayor en la cercanía de regiones aportantes de humedad como los mares y selvas tropicales (IDEAM, 2002; Llambí et al., 2012).

En su distribución multianual, la precipitación es típicamente bimodal con dos estaciones secas y dos húmedas, (debido a la ubicación del país cerca de la línea ecuatorial, y a la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical) o ser monomodal con una estación seca y una húmeda (Morales et al., 2007), aunque en algunas estaciones se observaron regímenes trimodales y tetramodales (Orlando Rangel et al., 2000). De acuerdo con la cantidad de lluvia, una clasificación ampliamente difundida en Colombia presenta 7 categorías que van de secas a pluviales como se muestra en la Tabla 3. La clasificación se propuso tomando datos de 74 estaciones pluviométricas de la región paramuna utilizando un modelo de distribución normal (Orlando Rangel et al., 2000).

| Clase | Clase I | Clase II | Clase III | Clase IV | Clase V | Clase VI | Clase VII |
|------------|----------|------------|-----------|------------|-------------|---------------------|-----------|
| Categoría | Seco | Semihúmedo | Húmedo | Muy Húmedo | Superhúmedo | Superhúmedo-pluvial | Pluvial |
| Rango (mm) | 623-1196 | 1197-1770 | 1771-2344 | 2345-2918 | 2919-3492 | 3493-4066 | >4066 |

Tabla 3. Clasificación de páramos de acuerdo al rango de precipitación anual (mm)

Fuente: (Orlando Rangel et al., 2000)

Geográficamente las zonas de alta montaña más húmedas se ubican en la vertiente occidental de la Cordillera Occidental (2500 – 3000 mm/año) y en el flanco oriental de la Cordillera Oriental (alrededor de 2000 mm/año). En el primer caso, se debe a las masas de aire cálido y húmedo que entran del Pacífico, y en el segundo por las que llegan de la Amazonia y la Orinoquia. En contraste los páramos más secos se ubican en el interior de la Cordillera Oriental, y en el occidente de la Cordillera Central.

Para el caso de la Cordillera Central, la vertiente oriental que da al valle del río Magdalena recibe más precipitaciones valle-montaña (entre 1500 y 2000 mm/año) que las de la vertiente occidental que da al estrecho valle del río Cauca (entre 500 y 1000 mm/año) (Orlando Rangel et al., 2000). Esto debido a los vientos en dirección al occidente, a la radiación solar que desde la mañana incide desde el oriente sobre el amplio valle y la ladera oriental de la cordillera.

En la Sierra Nevada de Santa Marta la parte norte más cerca del mar, presenta las precipitaciones más altas (alrededor de 3000 mm/año) que van reduciéndose hacia el sur (hasta unos 1500 mm/año). Sobre el nudo de los pastos, al suroccidente colombiano la región de alta montaña es más seca y las lluvias son menos abundantes (500-1000 mm/año) (IDEAM, 2002).

3.5.3. Variabilidad de la humedad relativa

La humedad relativa en alta montaña con frecuencia es muy alta, entre 80% y 98% durante gran parte de la noche y el día; posee un carácter variable y estacional (máxima en época de lluvias y mínima en las estaciones secas), y además suele presentarse el fenómeno de niebla (R. Hofstede et al., 2014), lo que aunado a la capacidad de intercepción de la vegetación de páramo le da importancia a la precipitación horizontal como una fuente de agua en las zonas de páramo.

La variabilidad de la humedad relativa entre sectores de alta montaña en Colombia, sigue patrones similares a la precipitación, derivados de su conexión con los vientos y las masas de aire húmedas. Frente al gradiente altitudinal, la humedad relativa disminuye ligeramente con la altitud en una tasa de aproximadamente 0.6% por cada 100 metros de altitud, y a diferencia de la temperatura, presenta cierta estabilidad en el ciclo diario, disminuyendo moderadamente en las horas diurnas (especialmente en días soleados y sin neblina), y alcanzando valores cercanos al punto de saturación en la noche (Tobón, 2022).

3.5.4. Radiación solar

La radiación solar esta correlacionada con la altitud, la latitud y la presencia de nubes o neblina. A menores alturas, la radiación debe atravesar una mayor cantidad de aire y nubes, por lo que pierde intensidad debido a procesos de absorción y reflexión. En los ecosistemas de alta montaña, la radiación es regularmente alta particularmente en cercanías de la línea equinoccial donde los rayos solares inciden de forma casi perpendicular (Llambí et al., 2012).

En Colombia, se reportan valores promedio de radiación en páramos, alrededor de los 255 W/m² (Tobón, 2022). Estacionalmente la radiación es baja en los períodos húmedos y se incrementa en los períodos secos, por la menor incidencia de la nubosidad, la lluvia y la neblina.

3.5.5. Glaciares

Colombia cuenta con pequeñas masas de hielo, que coronan las cimas de las montañas más altas del país, arriba de los 4850 metros sobre el nivel del mar aproximadamente. Pese a que no representan más que el 0.16% de los glaciares sudamericanos, los 37 km² de hielo existentes en Colombia para el año 2017 representan un excelente laboratorio de investigación de los efectos del cambio climático a nivel global. Se convierten en una rareza, por ende, un privilegio, al estar bajo la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical y no de estaciones, que caracterizan a regiones de mayores latitudes (Ceballos, 2012).

Actualmente sólo seis zonas tienen glaciares en Colombia de los cuales cuatro están sobre estructuras volcánicas clasificadas como activas (estratovolcanes). Los dos nevados restantes, caracterizados como sierras nevadas, se ubican sobre rocas no volcánicas. De norte a sur los glaciares son: Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, Volcán Nevado del Ruíz, Volcán Nevado Santa Isabel, Volcán Nevado del Tolima y Volcán Nevado del Huila.

Desde el punto de vista hidrológico los glaciares tienen una oferta hídrica **[E3]** alta por unidad de área, pero resultan más bien bajas en contexto, puesto que el área de los nevados colombianos es del 2% al 5% del área total de una cuenca hidrográfica típica de alta montaña (Ceballos, 2012). A pesar de lo anterior, los glaciares aumentan el aporte de agua cuando aumentan las temperaturas, es decir que pueden dar más agua justo en los períodos secos, contribuyendo a la regulación hídrica.

La ubicación ecuatorial de los glaciares colombianos los hace particularmente sensibles a las condiciones climáticas actuales, por lo que el área glaciaria continúa disminuyendo dramáticamente. En el periodo 2010 – 2019, las pérdidas se estimaron en un 23.6% del área total (IDEAM, 2019).

3.5.6. Vegetación

En la sección 3.4.2 se presentó una descripción general de la distribución de los tipos de vegetación en las diferentes franjas del gradiente altitudinal, y su relación con las unidades morfogénicas influenciadas por el clima y la dinámica glaciaria. A continuación, se sintetizan las principales características de dichas tipologías y en las secciones 3.5.7 y 3.5.8, se resumen los factores más representativos de las interacciones entre la vegetación con el balance hídrico: la interceptación, la precipitación horizontal y la evapotranspiración, advirtiendo que características de mayor detalle como la profundidad de las raíces y algunos rasgos funcionales tienen un importante valor explicativo en estas interacciones (GIMHA, 2021; Tobón, 2022).

Varios estudios presentan clasificaciones de las tipologías de vegetación en páramo con algunas diferencias (IDEAM, 2002; Morales et al., 2007), acá se tomará la presentada por el Instituto Humboldt para la delimitación de páramos (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010), por tener como referente altitudinal la cota de 2800 m s.n.m dentro del componente biofísico y por su cercanía al componente hidrológico. El criterio de división primaria para la vegetación (que resulta de interés hidrológico), es su carácter abierto o cerrado. La vegetación cerrada incluye bosques y matorrales, donde se constituye un dosel o bóveda superior (capa continua de follaje) de extensión y cobertura considerable (franjas altoandinas, subpáramo y páramo). En la vegetación abierta predominan los estratos bajos donde se tienen pajonales, frailejonales, rosetales, prados y turberas, los cuales no alcanzan a presentar un dosel superior (franjas de páramo y super páramo principalmente). La descripción de los principales tipos fisionómicos en la alta montaña se presenta a continuación (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010) con algunas referencias a las especies más representativas en cada tipo y a su presencia en distintas franjas del gradiente altitudinal, sectores de alta montaña y páramos.

Bosques achaparrados

Vegetación con un estrato de arbolitos de 8-10 m de altura dominados por pocas especies, como los bosques de *Escallonia myrtilloides* (tibar, rodamonte), de *Hesperomeles* (mortiño) y los bosques de *Polylepis* (palo colorado o coloradito) con una segregación geográfica de acuerdo con la distribución de la especie dominante; bosque de *Polylepis incana* en el sur (Nariño) y de *P. sericea* que se extiende hasta el centro-occidente (Quindío-Caldas).

Matorrales

Vegetación arbustiva, con predominio de elementos leñosos. Se establecen desde el páramo bajo hasta el superpáramo. Los matorrales con mayor área de distribución están dominados por especies de *Asteraceae* (géneros *Diplostegium* y *Pentacalia*), *Castilleja* e *Hypericum*. Entre las comunidades más ampliamente distribuidas se encuentran las de *Hypericum laricifolium* (Cordilleras Central, Oriental y Occidental), de *Pentacalia vernicosa* (Cordilleras Central, Oriental y Occidental) y de *Ageratina tinifolia* (Cordillera Oriental).

Pastizales-pajonales

Vegetación herbácea dominada por gramíneas en macollas. En condiciones originales del paisaje se encuentran desde el páramo propiamente dicho hasta el superpáramo. Entre las comunidades mejor representadas según el área de distribución en el páramo colombiano, figuran las de *Calamagrostis effusa* (Cordilleras Central, Oriental y Occidental), de *Calamagrostis recta* (Cordillera Central) y de *Agrostis toluensis* (Cordillera Oriental).

Frailejonales-rosetales

Vegetación con un estrato arbustivo emergente conformado por las rosetas de *Espeletia*, *Espeletiopsis* y *Libanothamnus*, entre otros. Se les registra desde el páramo bajo hasta los límites con las nieves perpetuas; con preferencia logran su mayor representatividad en el páramo propiamente dicho. en la Cordillera Oriental colombiana hay una amplia gama de comunidades dominadas por *Espeletia* (O. Rangel & Sturm, 1995, citado en MAVDT & Instituto Humboldt, 2010).

Prados, turberas-tremedales o agrupaciones de plantas vasculares en cojín

Vegetación con predominio del estrato rasante o en algunos casos con un estrato herbáceo pobre en cobertura. Dentro de la categoría se pueden incluir a:

- Colchones compactos de *Distichia muscoides*
- Cojines de *Oreobolus* (*O. cleefii*, *O. poepigeri*)
- Cojines-almohadillas con especies de *Azorella* (*Apiaceae*)
- Cojines con *Arenaria musciformis* y *A. venezuelensis* (*Caryophyllaceae*)

Chuscales

Vegetación dominada homogéneamente por el bambú paramuno *Chusquea tessellata*; se establecen en sitios húmedos hasta pantanosos. En el volcán del Puracé (Rangel y Lozano, 1986, citado en MAVDT & Instituto Humboldt, 2010) en áreas cercanas a la laguna San Rafael también se presentan formaciones densas dominadas por *Neurolepis aperta*, situación a primera vista muy similar a la de Ecuador (Neil, 1999 citado en ibid.).

En Colombia, los chuscales con *Chusquea tessellata* pueden encontrarse como vegetación azonal en las orillas de las lagunetas y charcas en la mayoría de páramos, o como vegetación zonal cubriendo homogéneamente grandes extensiones, como sucede en el páramo del Nevado del Huila, Cordillera Central y en los páramos del macizo de Tatamá, Cordillera Occidental.

Rosetales con especies de puya

En los páramos húmedos son frecuentes las rosetas gigantes de especies de Puya (*P. santosii*, *P. goudotiana*, *P. trianae*) en las fases finales de colmatación de lagunetas y lagunas del páramo.

Rosetales bajos

En el superpáramo son muy vistosas las comunidades dominadas por:

- *Draba litamo* y *Draba hamennii* en la Sierra Nevada del Cocuy, por encima de 4100 m.
- *Draba pennell-hazenii* y *D. pachythyrsa* en el Parque de Los Nevados (nevados del Ruíz y del Quindío), por encima de 4200 m.
- *Draba rositae* en los páramos de Guerrero y del macizo del Sumapaz, entre 3500 y 4000 m.
- *Draba hallii* y *D. alyssoides* en la Cordillera Central y en los páramos del sur (Nariño).

Cada uno de los tipos fisionómicos anteriormente descritos tienen rasgos funcionales y características particulares, que son de interés hidrológico ya que se asocian a interacciones de la vegetación con el agua. Sin embargo, estos tipos pueden presentarse de forma agrupada conformando asociaciones cuyas relaciones configuran un comportamiento hidrológico diferente al de sus tipos fisionómicos individuales.

Para tener en cuenta las interacciones entre los diferentes tipos fisionómicos que integran una asociación suelen utilizarse en modelación hidrológica categorías que agregan varios tipos de vegetación. La Tabla 4 presenta una versión simplificada de las relaciones entre tipos fisionómicos de alta montaña y categorías de la

metodología Corine Land Cover. Sin embargo, se resalta la necesidad de estudios más detallados que permitan profundizar en las regularidades en el comportamiento hidrológico de diferentes asociaciones de vegetación en la alta montaña, y la capacidad de metodologías de clasificación como la Corine Land Cover, la de zonas de vida de Holdridge (entre otras) para capturar estas regularidades hidrológicas.

| Categoría CLC | Tipo fisionómico de páramo | Características |
|--------------------|--------------------------------|--|
| Bosques bajos | Boque achaparrado | Arbolitos de 8-10 m |
| Herbazal | Pastizales – Pajonales | Vegetación herbácea dominada por gramíneas en macollas |
| Herbazal inundable | Chuscales | Vegetación herbácea perenne dominada por el bambú paramuno Chusquea tessellata |
| | Rosetales con especies de puya | -- |
| | Rosetales bajos | -- |
| Arbustal | Matorral | Vegetación arbustiva con predominio de elementos leñosos |
| | Frailejonales – Rosetales | Vegetación con un estrato arbustivo emergente |
| Turberas | Turberas, prados y tremedales | Vegetación con predominio del estrato rasante presente en zonas muy húmedas y pantanos |

Tabla 4. Relación entre tipos fisionómicos de páramo y coberturas CLC

Fuente: Elaboración propia

3.5.7. Intercepción de la precipitación y de la niebla

La intercepción es una interacción de la vegetación con el agua en diferentes formas, que da origen a flujos y almacenamientos dentro del balance hídrico, que dificultan su medición en campo. La intercepción puede ser del agua en forma de gotas de lluvia, de niebla, o de humedad directa del aire que se condensa como rocío. En este texto, la intercepción de las gotas de lluvia se identificará como intercepción de la precipitación, y hará referencia únicamente al agua que queda retenida en las hojas y que se configura en almacenamiento en la vegetación **[A0]**.

Por otro lado, la intercepción de la neblina y la humedad del aire puede contribuir al almacenamiento en las plantas, o una vez superada la capacidad de almacenamiento, constituir una entrada adicional al balance hídrico. En el primer caso, la intercepción se convierte nuevamente en vapor de agua, y en el segundo se configura en una entrada al balance hídrico que comúnmente se conoce como precipitación horizontal **[E2]**. Una de las dificultades en la medición de la precipitación horizontal se deriva de la necesidad de establecer en qué momento se supera la capacidad de almacenamiento de la vegetación, para lograr que el agua ingrese efectivamente al balance hídrico, lo que además puede estar influenciado por eventos previos de lluvia que también interactúan con la captura de agua de la niebla y la humedad del aire.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este documento no se presenta una sección explícita sobre precipitación horizontal, sino más bien sobre intercepción de la niebla, pues esta interacción abarca tanto la posibilidad de almacenamiento en la vegetación, como la de ingreso al balance hídrico.

Intercepción de la precipitación

La intercepción de la precipitación es una fracción de la precipitación que no llega al suelo, sino que queda almacenada en la vegetación. Cuando la lluvia tiene la suficiente intensidad o duración, la capacidad de almacenamiento [A0] se supera, y el excedente de agua empieza a fluir al suelo. Durante y después del evento de precipitación, este almacenamiento se evapora y retorna a la atmósfera (Llambí et al., 2012) constituyendo una salida o pérdida del balance hidrológico.

Investigaciones en Colombia realizadas en tres páramos de diferentes características de precipitación que van de seco a húmedo (Tobón, 2022), mostraron una alta variabilidad espacial de la intercepción de la precipitación, y una correlación positiva con el índice de área foliar. La variable controlante, fue la intensidad de la precipitación mostrando proporcionalidad directa para eventos aislados inferiores a 0.5 mm, y correlación potencial negativa para lluvias de mayor intensidad. En estos casos y en eventos de lluvia separados solo por algunas horas, la humedad remanente de la vegetación produjo una reducción de los valores de intercepción.

Para los tres paramos estudiados los valores promedio de intercepción en porcentaje de la precipitación anual fueron 9.5% (seco), 7.9% (semihúmedo) y 8.3% (húmedo), que no indican diferencias relativas importantes entre paramos secos y húmedos. Entre tanto, la capacidad promedio de almacenamiento de agua por dosel fue de 0.57 mm, donde *Calamagrostis*, fue la especie evaluada de mayor capacidad de intercepción, seguida por *Espeletia*. La menor capacidad se encontró en especies arbustivas como las *Hypericaceae* y *Ericaceae* (Tobón, 2022).

Intercepción de la niebla

Además de la lluvia, la vegetación de páramo también captura diminutas gotas de agua de la niebla y condensa parte de la humedad del aire. Para ecosistemas de páramo este proceso puede representar entradas importantes al balance hídrico [E2], pues se han reportado valores de precipitación horizontal que representan entre el 5% y el 20% de la precipitación total (Bruijnzeel & Proctor, 1995; Atarof & Rada, 2000 citados en R. Hofstede et al., 2014).

El agua interceptada de esta forma, puede evaporarse y retornar a la atmósfera, o bien escurrir o gotear al suelo. Además de estos efectos directos sobre el balance hidrológico, la intercepción de la niebla también tiene impacto sobre la evapotranspiración, ejerciendo un efecto restrictivo porque implica altas humedades del aire y reducción de la radiación solar incidente (Alvarado-Barrientos et al., 2014; Bittencourt et al., 2019; Chung et al., 2017; Lin et al., 2020 citados en Tobón, 2022).

En una síntesis de varios estudios (Tobón, 2022) se señala como principales factores de influencia atmosféricos sobre la intercepción de la niebla, a las variables i) velocidad del viento, iii) densidad de la niebla, iv) frecuencia de niebla y iv) eventos previos de lluvia. Los factores asociados a la vegetación incluyen i) altura, cobertura y estructura del dosel, ii) exposición a la dirección predominante del viento y iii) características físicas de la vegetación.

Mayores velocidades del viento, densidad de niebla, frecuencia de niebla y lluvias recientes, se asocian con un aumento de la intercepción de la niebla. En primer caso, vientos más fuertes, aumentan el flujo de gotas que impactan la vegetación, mientras que la niebla más frecuente o más densa implica mayor cantidad de agua disponible. El impacto positivo de la lluvia se asocia al fenómeno de coalescencia por el que el agua interceptada de la precipitación contribuye positivamente a la captura de más gotas de la niebla. En cuanto a

la vegetación mayores áreas de contacto, y características específicas como la pubescencia, se asocian a valores más altos de intercepción de la niebla.

En el estudio más riguroso en Colombia sobre el tema (Tobón, 2022), se encontró alta variabilidad de la intercepción de la niebla, tanto espacial como temporal, en un mismo páramo y entre páramos. La información se tomó realizando medidas directas e indirectas. Las metodologías utilizadas fueron:

- i. Medición directa de la intercepción del agua de la niebla a través de neblinómetros.
- ii. Mediciones directas por exposición a eventos de niebla de individuos de las especies más abundantes en cada páramo y la medición del agua interceptada por cada individuo.
- iii. Medición de los cambios de la humedad del dosel de la vegetación durante los eventos de niebla.
- iv. Cuantificación de los incrementos de la humedad del suelo en los primeros 10 cm del perfil de los suelos.

Comparaciones entre los valores anuales registrados por cada método muestran una baja relación entre estos. El autor sugiere el método (iii), como el más representativo de las entradas de agua a ecosistemas de páramo debido a la niebla, con valores entre 117,4 y 275 mm año⁻¹, y un promedio general de 192.1 ± 57.8 mm año⁻¹, valor que excede considerablemente aquellos encontrados por los otros métodos. Sin embargo, en términos generales lo que se destaca del estudio es la dificultad en la medición de esta variable, y las debilidades de los diferentes métodos, que muestran lo problemático de usar datos de neblinómetros y recolectores de niebla como medidas directas de entradas al balance hídrico por precipitación horizontal.

3.5.8. Evaporación y transpiración

La evaporación [F1] y la transpiración [F5] son procesos del balance hídrico, que en zonas con cobertura vegetal se agrupan en la evapotranspiración, siendo la transpiración el proceso por el cual las plantas liberan agua en forma de vapor a través de pequeñas aberturas en sus hojas llamadas estomas.

En términos generales (exceptuando páramos secos), los valores de evapotranspiración en los páramos son bajos, lo que representa mayores excedentes de agua disponibles para continuar circulando en el ciclo hidrológico. Esto se debe a una conjunción de factores que incluyen: bajo consumo de agua de las plantas, temperaturas reducidas, humedad relativa cerca del punto de saturación, alta frecuencia de eventos de niebla que limita la radiación y aspectos de la vegetación como el control estomático (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010; Tobón, 2022).

Estos mismos factores determinan la variabilidad espacial y temporal de la evapotranspiración, por ejemplo, temperaturas más altas y menor incidencia de neblina, implican un aumento en la evapotranspiración, tanto para días soleados y despejados (variación temporal), como para páramos más secos o partes más bajas del gradiente altitudinal.

Investigaciones sobre seis páramos de Colombia (Tobón, 2022) indican un promedio anual de evapotranspiración real o actual (Eta) de 481,4 ± 54,6 mm año⁻¹, con un rango entre 575.2 y 432 mm año⁻¹. Entre tanto, el promedio general diario para todos los páramos fue de 1.14 ± 0.76 mm d⁻¹, valor que osciló entre 4.89 y 0.24 mm d⁻¹, lo que muestra una alta variación temporal en la evapotranspiración. El estudio también destaca que, en la mayoría de los páramos de Colombia, la evapotranspiración potencial está cercana a la real o actual.

3.5.9.Suelos

Los suelos de alta montaña, presentan una gran variabilidad espacial a nivel local, entre sectores y entre vertientes. En general como consecuencia de la morfogénesis de la alta montaña colombiana (sección 3.4.1), estos suelos son relativamente jóvenes, poco desarrollados (superficiales a medianamente profundos) y con alto contenido de materia orgánica. En el origen de estos suelos tienen alta influencia los procesos asociados a la dinámica glaciaria de la que se derivan importantes diferencias sobre el gradiente altitudinal en cuanto a material parental, condiciones climáticas, relieve y desarrollo de vegetación.

En la zona más baja de la alta montaña, una parte significativa del material parental consistió en depósitos de materiales heterométricos de origen aluvio-torrencial y fluvio-glaciario. A medida que se asciende, el material cambia por el material superficial modelado por el glaciar, que paulatinamente se descubría ante el retroceso de este. Con el aumento gradual de la temperatura, las regiones más bajas descubiertas de glaciar fueron aptas para el crecimiento de la vegetación con el consecuente desarrollo de los suelos, inexistente o muy limitado, por lo tanto, en las zonas más altas sin vegetación (Llambí et al., 2012)

Además del material parental, el clima, la vegetación y el gradiente altitudinal, algunas de las características diferenciales más relevantes de los suelos altoandinos se derivan de la morfología del terreno y de la influencia de materiales volcánicos.

En las depresiones de los páramos, y cuando el clima es muy húmedo, se desarrollan suelos turbosos con muy alto contenido de materia orgánica, en parte relacionados con tipos de vegetación de pantano o turbera (Histosoles) (Malagón y Pulido. 2000 citado en Hofstede et al., 2014). Estos suelos pueden alcanzar profundidades moderadas como consecuencia de la alta acumulación de materia orgánica, por las bajas tasas de descomposición. En contraste, la profundidad de los suelos en laderas es mucho menor, básicamente porque las pendientes favorecen el arrastre y no la acumulación de materiales sobre la superficie (Llambí et al., 2019).

El Macizo colombiano y toda la Cordillera Central están ubicados sobre volcanes activos, por tanto, los suelos se desarrollaron a partir de la intemperización de cenizas volcánicas (Andisoles). En otras regiones como la Cordillera Oriental colombiana y la Sierra Nevada de Santa Marta los suelos se formaron sobre rocas sedimentarias y metamórficas y sin cenizas, donde predominan suelos incipientes o muy jóvenes de los órdenes Entisoles e Inceptisoles respectivamente (Hofstede et al., 2014). Entre vertientes, las principales variaciones de los suelos se relacionan con los diferentes niveles de exposición a la humedad, que siguen los patrones mencionados para la precipitación (IDEAM, 2002).

Los suelos con influencia de material volcánico aparecen intercalados con horizontes orgánicos y pueden alcanzar mayores profundidades que en áreas no volcánicas. En ausencia de material volcánico los suelos se desarrollaron a partir de la interacción entre el material parental y materia orgánica, generando suelos menos profundos, excepto en zonas cóncavas y húmedas (Tobón, 2022).

En cuanto a propiedades de interés hidrológico, se encontraron densidades aparente bajas, valores de medios a altos de conductividad hidráulica saturada y valores altos de porosidad, capacidad de infiltración y capacidad de retención de humedad. El tipo de estructura más común observada en la franja paramuna corresponde a bloques subangulares con texturas de francas a franca arenosas excepto en suelos que presentan material volcánico, que aparece suelto y sin estructura (Tobón, 2022).

Los factores determinantes de estas propiedades de interés hidrológico de los suelos son el grado de intervención antrópica, la influencia de material volcánico y la cantidad de materia orgánica. La intervención antrópica, causa erosión de los suelos y compactación, con consecuencias como la reducción de la porosidad que deriva en pérdida de la capacidad de almacenamiento, reducción de la capacidad de infiltración y disminución de la conductividad hidráulica saturada (K_s más bajos).

En horizontes de suelos con materiales volcánicos, la mayor incidencia de macroporos permiten un flujo más libre del agua, y en consecuencia conductividades hidráulicas altas, pero menor capacidad de almacenamiento comparados con horizontes o suelos abundantes en materia orgánica; en este caso los poros de menor tamaño favorecen la retención de agua y limitan la conductividad hidráulica saturada (Llambí et al., 2012). La Figura 5 presenta los rangos de conductividad hidráulica del suelo para 7 páramos de Colombia (Tobón, 2022).

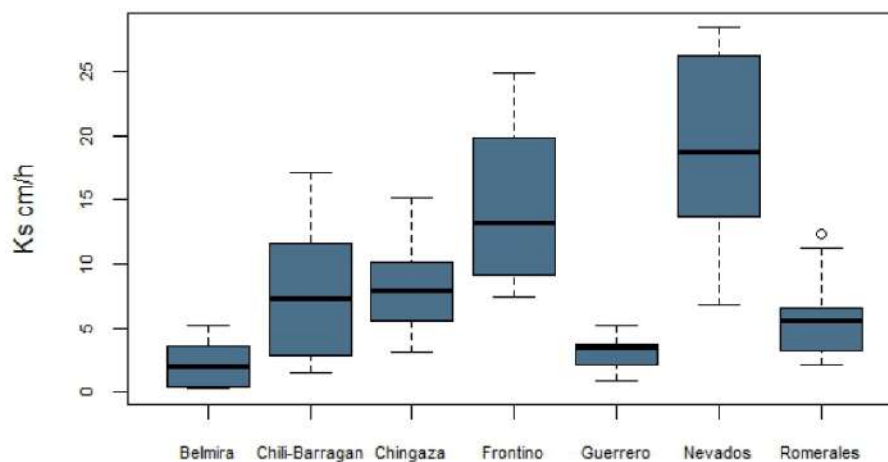


Figura 5. Conductividad hidráulica para 7 páramos de Colombia

Fuente: (Tobón, 2022)

Una consecuencia importante a nivel hidrológico de la interacción de las propiedades de los suelos con el clima en páramos, es que las intensidades de la precipitación (generalmente bajas) no superan regularmente la alta capacidad de infiltración del suelo, lo que genera bajos valores de escorrentía superficial [F2] y altos valores de interflujo [F6] (Tobón, 2022).

3.5.10. Lagunas, humedales, y turberas

Como se mencionó en la sección 3.4.1 el modelado glaciar heredado (MAh) donde se ubican las franjas de páramo y subpáramo, dio lugar a depresiones locales, concavidades y valles donde se emplazan una importante cantidad de lagos, humedales y pantanos que funcionan como reservorios naturales de agua (Buytaert, De Bièvre, et al., 2006). La distribución de lagunas entre sectores de alta montaña se resume en la Tabla 5, siendo el sector de la Cordillera Oriental el que presenta mayor número de lagunas, mientras que en la Cordillera Occidental se tiene un número muy reducido ya que allí los glaciares fueron poco extensos debido a la baja altitud de la cordillera (Ríos & Flórez, 2005 citado en IDEAM, 2010a).

| Ubicación | Área km ² | Número de Lagunas | Área km ² alta montaña |
|------------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Sierra Nevada de Santa Marta | 15 | 383 | 1.697 |
| Cordillera Oriental | 87 | 693 | 19.815 |
| Cordillera Central | 33 | 445 | 19.568 |
| Cordillera Occidental | 0.3 | 7 | 452 |
| Total | 135 | 1.528 | 41.832 |

Tabla 5. Lagunas en sectores de alta montaña

Fuente: (IDEAM, 2010b)

En el caso de la Sierra Nevada de Santa Marta, la abundancia de lagunas se explica por el control tectónico de los valles glaciares a lo largo de las numerosas fallas y fracturas en los esquistos donde los glaciares tallaron abundantes depresiones (IDEAM, 2010b).

En los humedales predominan formas de crecimiento gramínoideas (*Poaceae* y *Cyperaceae*), plantas en cojín y hierbas postradas, mientras las turberas están dominadas por musgos (Rangel Ch. y Pinto Zarate, 2012; Sarmiento & León, 2015 citados en IDEAM et al., 2018). Una de las consecuencias de la destrucción de la flora nativa y el uso de los suelos ha sido principalmente la aceleración del escurrimiento superficial del agua con truncamiento parcial de los suelos y transporte de sedimentos finos hacia las lagunas y quebradas. Las lagunas que, en general, son poco profundas se colmatan fácilmente para convertirse en pantanos (turberas) que luego pueden ser drenados artificialmente para convertirlos en tierras de cultivo (IDEAM, 2010b).

Los humedales de los ecosistemas de páramo también pueden presentar interacciones con las aguas subterráneas, ya sea que dependan de los caudales procedentes de acuíferos o que sean fuente de recarga, lo que determina su influencia en los caudales base aguas abajo de una cuenca hidrográfica (Rivera & Rodríguez, 2011).

3.5.11. Aguas subterráneas

En los páramos se han reconocido sistemas de flujo subterráneos de incidencia regional, intermedia y local. Estos flujos están asociados a la permanencia de lagunas, humedales y manantiales y en ocasiones a su interacción con acuíferos (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010). Las características geológicas de la alta montaña en Colombia, sugieren una mayor incidencia de flujos subterráneos en el sector de la Cordillera Oriental, por su mayor número de lagunas y ya que el agua puede infiltrarse por los planos de estratificación de alternancias de areniscas y calizas, pues la parte alta de esta formación montañosa es un dominio sedimentario desarrollado sobre rocas siliciclásticas y carbonatadas cretácicas, que presentan cavernas y dolinas propias de ambientes cársticos. Tal es el caso de los páramos de Santander y el Sumapaz a la altura de las lagunas del Cobre, la Guitarra y el Gallo (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010).

Cerca de esta región, en el páramo de Santurbán en Norte de Santander, se reportan estudios de monitoreo isotópico realizado en muestras de aguas lluvias, manantiales y cauces a diferentes alturas. La comparación de la composición isotópica de las diferentes muestras, apunta a que el mecanismo hidrológico preferencial,

por el cual se mantienen los caudales no es la precipitación y, por el contrario, esta actúa como fuente de recarga de agua en los suelos (García, 2018).

Sin embargo, para determinar la incidencia de agua subterráneas, puede requerirse de estudios que indaguen la composición isotópica de pozos profundos o acuíferos, que permitan distinguir entre flujos más profundos [F8, F9] y el flujo a través de los horizontes de suelo que llega a los cauces [F6]. Este último como se mencionó en la sección 2.2, tiene una importante incidencia en páramos por la alta conductividad hidráulica del suelo.

3.6.IMPACTOS ANTRÓPICOS EN ECOSISTEMAS DE PARAMO

Las actividades antrópicas que generan mayores impactos en la alta montaña son la ganadería, la agricultura y las quemadas generalmente asociadas a ellas, principalmente en las franjas bajas de bosque altoandino y subpáramo (Rivera & Rodríguez, 2011). Actividades como minería y forestación también generan impactos, aunque mucho más localizados en zonas específicas. El turismo, la caza y la extracción de plantas medicinales pueden considerarse como generadoras de impacto, aunque en una extensión mucho menor. En términos generales el impacto de las actividades antrópicas es dominante frente a los efectos climáticos. Estos últimos vienen más bien a reforzar los impactos antrópicos, y se hacen notorios en áreas poco intervenidas.

A nivel nacional las transformaciones antrópicas más significativas se dan en el sector de la Cordillera Oriental, en los páramos ubicados en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander. Otros sectores con alta intervención incluyen páramos de los departamentos de Cauca, Nariño y sur del Tolima, donde se encuentran grandes asentamientos humanos (IDEAM, 2002).

Los impactos más importantes de las actividades antrópicas son pérdida de biodiversidad, reducción del carbono almacenado, contaminación de aguas y suelos, y alteración de variables hídricas, en particular la reducción de la capacidad de regulación hídrica y de la oferta hídrica. Los impactos directos más representativos de los cambios en las coberturas naturales sobre variables hídricas son (R. Hofstede et al., 2014; Llambí et al., 2012):

i) Aumento de las tasas de evapotranspiración lo que implica una devolución de mayor cantidad de agua a la atmósfera, y reducción del agua disponible para continuar en el ciclo hidrológico. Como consecuencia ocurre una disminución del agua para almacenar en suelos y para fluir hacia los cauces que se traduce en pérdida de regulación hídrica y reducción de caudales. Esto es lo que ocurre generalmente cuando se sustituyen coberturas de páramo con plantaciones de pino y eucalipto, especies con altas tasas de evapotranspiración. Buytaert et al. (2007), demostraron en un estudio de cuencas comparadas que las plantaciones de pino pueden reducir el rendimiento hídrico del páramo hasta en un 60%, más aún que los cultivos agrícolas.

ii) Aumento en la tasa de evaporación debido a la incidencia más directa de la radiación sobre el agua almacenada superficialmente y en los suelos, es decir más vapor de agua devuelto a la atmósfera por la mayor cantidad de energía incidente. Esto sucede en zonas que pasaron de cobertura cerrada (franja de bosque altoandino y subpáramo principalmente), a pastos o a suelo desnudo por quemadas. Las coberturas cerradas ofrecen una protección de los rayos solares que deja de existir cuando se pierden las coberturas naturales. El efecto neto es similar al descrito en el ítem anterior (i).

iii) Reducción de entradas al balance hídrico por pérdida de las coberturas vegetales que interceptan agua de la niebla, lo que deriva en menos agua disponible para los suelos y cauces como en el ítem (i).

iv) Pérdida de la capacidad de almacenamiento del suelo por el deterioro de su capa superficial debido a la exposición directa a la radiación y el viento. Los suelos desprovistos de cobertura vegetal natural se secan, pierden carbono, reducen su velocidad de infiltración y su permeabilidad, y en términos generales desarrollan hidrofobia (Poulenard et al. 2004). Esto deriva en la reducción de la regulación hídrica.

Los cambios en los suelos tienen como antecedente por término general un cambio en las coberturas, y por lo tanto siempre irán de la mano con algunos de los impactos mencionados anteriormente. De manera adicional los cambios en los suelos también impactan el balance hídrico de la siguiente forma:

v) Pérdida de la regulación hídrica bien sea por la reducción en la capacidad de almacenamiento, por la pérdida de suelo superficial o por el deterioro de su estructura. El pisoteo del ganado y el uso de maquinaria para la adecuación de suelos compacta el terreno, lo que en términos hidrológicos significa reducción de la porosidad o pérdida de volumen útil para almacenamiento. Adicionalmente el paso constante del ganado, el arado y el volcamiento de suelos, causan erosión, la superficie de los suelos se fragmenta haciéndola más proclive al arrastre por escorrentía y al secamiento. Horizontes y suelos degradados reducen su volumen de almacenamiento de agua y pierden capacidad de regulación hídrica.

3.7.INICIATIVAS DE MONITOREO HIDROCLIMÁTICO EN ALTA MONTAÑA

En esta sección se presentan las iniciativas de monitoreo más relevantes para la componente hidroclimática. A nivel nacional, la mayor cantidad de información es generada por el IDEAM, tanto en aspectos o variables directamente relacionados con el monitoreo hidrológico (precipitación, temperatura, caudales y glaciares) como en variables de áreas afines (carbono, bosques). Aunque se cuenta con una red de monitoreo isotópico y de aguas subterráneas, no se encontraron reportes de estaciones de monitoreo de este tipo en alta montaña.

A nivel transnacional la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (IMHEA), es la más cercana a la temática de estos lineamientos. Actualmente tiene cuencas monitoreadas en el páramo de Guantiva-La Rusia, departamento de Boyacá en el marco del proyecto Paraguas, cuyas instituciones socias son la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (<https://imhea.org/>).

En términos generales el monitoreo en páramos es limitado, particularmente en la variable de caudal, donde solo se encontraron estaciones activas limnimétricas o limnigráficas del IDEAM en un 25% de los complejos de páramo.

3.7.1.Monitoreo hidrometeorológico del IDEAM

La principal fuente de información hidroclimática del país corresponde al IDEAM, quien consolida la información de sus estaciones en la plataforma de servicios de datos hidrometeorológicos DHIME², que a su vez hace parte del Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC. Esta plataforma cuenta en su catálogo de estaciones con información adicional orientativa de otras fuentes como Corporaciones Autónomas Regionales CAR, sector hidroenergético, sector académico e investigativo. Sin embargo, las series de datos

² <http://dhime.ideam.gov.co/>

de estaciones que no son propiedad del IDEAM, deben solicitarse directamente a las CAR o a los establecimientos específicos que las consolidan o generan.

De acuerdo al catálogo de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, en el país se miden las siguientes variables hidrometeorológicas básicas: brillo solar, caudal, dirección del viento, evaporación, humedad relativa, nivel, nubosidad, precipitación, presión atmosférica, radiación solar, temperatura, velocidad del viento y recorrido del viento. La Tabla 6, resume la tipología de estaciones y las correspondientes variables medidas de acuerdo al catálogo nacional de estaciones IDEAM (IDEAM., 2019).

| Categoría de estación | Tipos de variables medidas |
|--------------------------------|--|
| Agrometeorológica | Observaciones de la estación climatológica principal, más registros de temperatura a varias profundidades y en la capa cercana al suelo |
| Climatológica Ordinaria | Precipitación, temperatura del aire, temperaturas máxima y mínima a 2 metros y humedad |
| Climatológica Principal | Precipitación, temperatura del aire, temperaturas máxima y mínima a 2 metros, humedad, viento, radiación, brillo solar, evaporación, temperaturas extremas del tanque de evaporación, cantidad de nubes y fenómenos especiales |
| Limnigráfica | Nivel de una corriente hídrica |
| Limnimétrica | Nivel de una corriente hídrica |
| Meteorológica especial | Para realizar seguimiento a un fenómeno o un fin específico como las heladas. |
| Pluviográfica | Registra en forma mecánica y continua la precipitación, en una gráfica que permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en que ha ocurrido la lluvia. |
| Pluviométrica | Capaz de medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas |

Tabla 6. Tipos de estaciones y variables medidas en la red de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM

Fuente: DHIME- IDEAM

En áreas de páramos se cuenta con aproximadamente 270 estaciones hidrometeorológicas que miden una o algunas de las anteriores variables. De dichas estaciones 77 son hidrológicas (nivel/caudal), 190 meteorológicas (variables climáticas) y 3 son combinadas (García, 2018). Para la EMA-LHC, pueden resultar útiles estaciones por fuera de las áreas de páramo, ya que la altura de referencia establecida por la EMA para los socioecosistemas de alta montaña es de 2800 metros, y pueden aprovecharse inclusive estaciones a menor altura siempre y cuando se encuentren cerca del paisaje o área hidrográfica objeto de análisis. En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que el catálogo incluye estaciones no operativas y en mantenimiento.

Para la implementación de modelos hidrológicos es fundamental contar con estaciones de monitoreo de niveles o caudales, que permitan la calibración y validación de resultados. La Figura 6 presenta la localización de estaciones de caudales en regiones de alta montaña en Colombia.

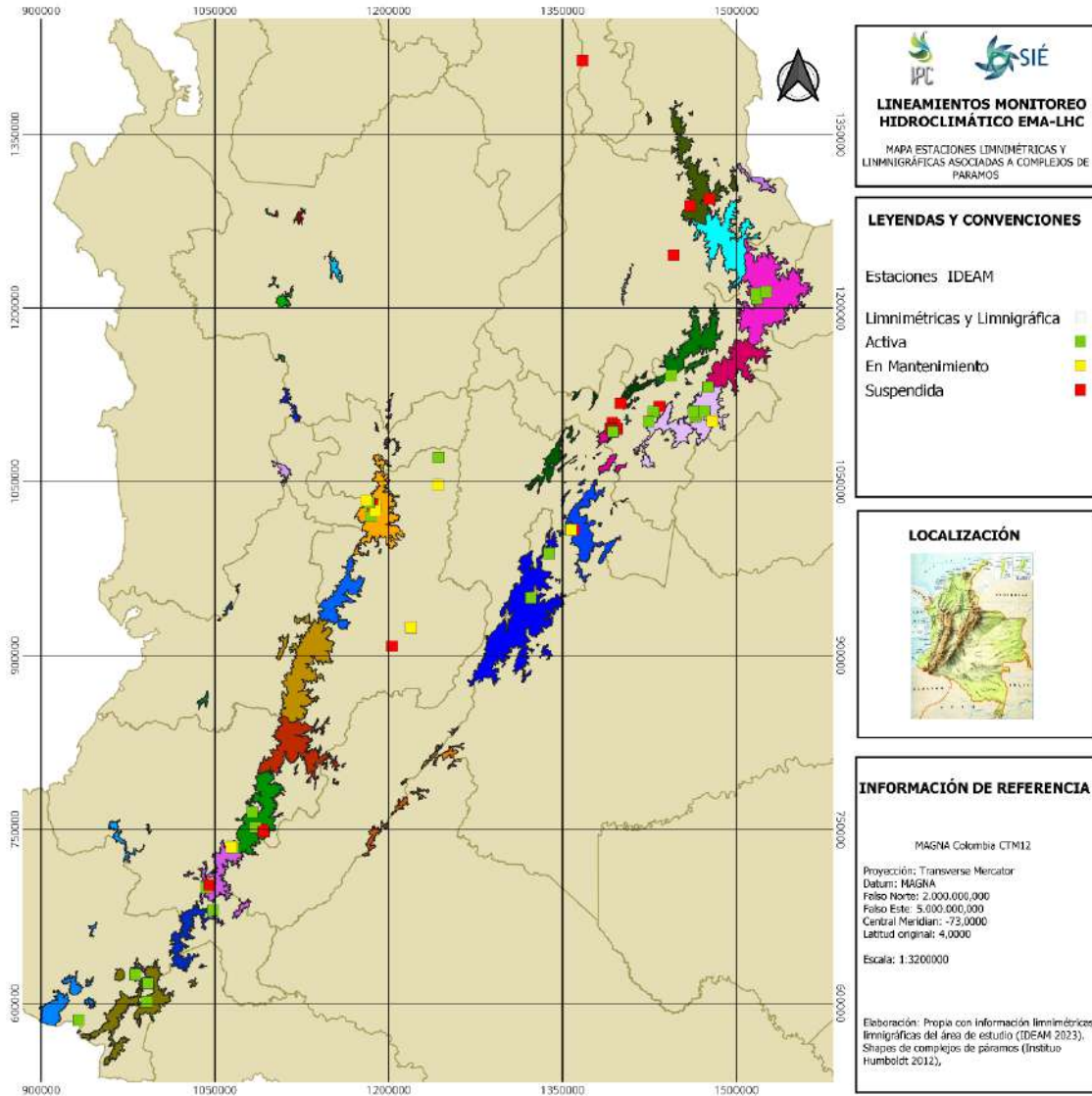


Figura 6. Estaciones limnigráficas y limnimétricas por encima de los 2700 m s.n.m

Fuente: Elaboración propia con datos del DHIME-IDEAM

Los complejos de páramos que cuentan con estaciones limnigráficas o limnimétricas del IDEAM, entro o cerca de sus límites, se presentan en el Anexo 1. Los complejos con estaciones activas (Tabla 7) tienen el mejor escenario para el monitoreo hidroclimático con objetivos de modelación hidrológica (sección 6.5.1), con los que se pueda avanzar en el conocimiento de la hidrología de la alta montaña y la estimación de los impactos de los cambios en las coberturas sobre la regulación y la oferta hídrica.

| Complejo | Número de estaciones |
|-------------------------------|----------------------|
| Cruz Verde - Sumapaz | 2 |
| Doña Juana - Chimayoy | 2 |
| Guanacas - Puracé - Coconucos | 4 |
| La Cocha - Patascoy | 4 |
| Los Nevados | 3 |
| Rabanal y río Bogotá | 1 |
| Sierra Nevada del Cocuy | 4 |
| Tota - Bijagual - Mamapacha | 8 |

Tabla 7. Complejos con estaciones limnigráficas o limnimétricas activas del IDEAM

Fuente: Elaboración propia con datos DHIME – IDEAM

El IDEAM deberá estudiar la intervención prioritaria de las estaciones en mantenimiento y suspendidas (Anexo II), por la importancia que representan los ecosistemas de alta montaña para la conservación del recurso hídrico del país.

3.7.2. Monitoreo de glaciares del IDEAM

En la actualidad, el IDEAM realiza trabajos glaciológicos aplicando técnicas de cuantificación y cualificación de parámetros glaciológicos, hidrogliaciológicos y atmosféricos que permiten evaluar la dinámica y evolución de los glaciares, siguiendo metodologías recomendadas por el Grupo de Trabajo de Nieves y Hielos (GTNH), el Institut de Recherche Pour le Développement (IRD), la Universidad de Zurich (Suiza) y el World Glacier Monitoring Service (WGSM, por sus siglas en inglés).

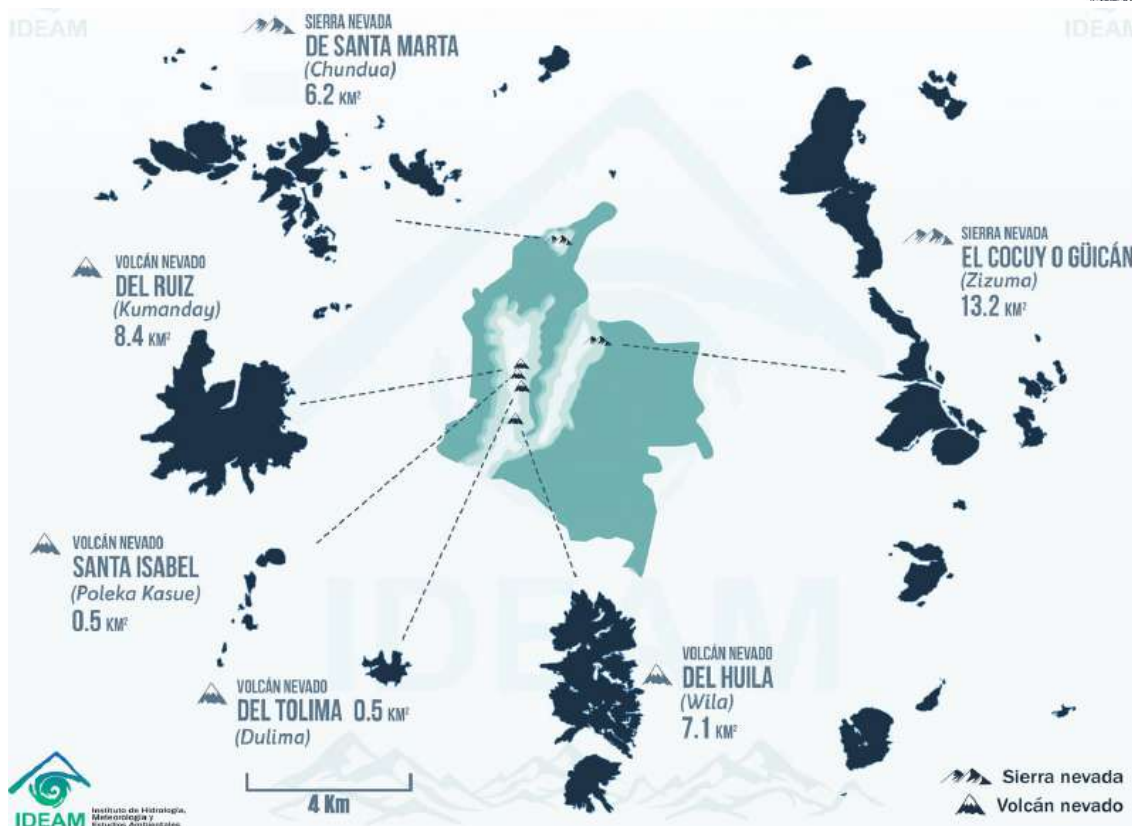


Figura 7. Glaciares de Colombia

Fuente: (IDEAM, 2019)

Los seis glaciares actuales de Colombia (Figura 7) son objeto de algún tipo de seguimiento a su dinámica. En general y como un primer nivel de observación, el área de cobertura de hielo se calcula indirectamente a partir de imágenes satelitales de alta resolución espacial. Este cálculo de superficie se realiza cada 3 a 5 años (Ceballos, 2012).

En Colombia se monitorean en detalle, es decir directamente en campo, dos glaciares: Volcán Nevado Santa Isabel y Sierra Nevada de El Cocuy o Güicán permitiendo contar con variables como espesor de hielo, área del glaciar y balance de masa del glaciar (IDEAM, 2019).

3.7.3. Monitoreo de aguas subterráneas IDEAM

La Subdirección de Hidrología del IDEAM ha avanzado en el desarrollo e implementación de estrategias a nivel nacional que contribuyen en la evaluación y gestión de las aguas subterráneas en Colombia.

De acuerdo al IDEAM, Estas estrategias se han enfocado en la implementación y operación de las redes nacionales de monitoreo de aguas subterráneas y de isotopía, en la elaboración del “Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua” (IDEAM & INVERMAR, 2021), de la “Guía metodológica de delimitación de zonas de recarga de acuíferos” (no se encontró la publicación), y en el fortalecimiento de algunas Corporaciones para incluir las aguas subterráneas en los temas prioritarios de planeación operativa (IDEAM, n.d.).

De acuerdo al SIAC, Colombia cuenta con una zonificación de unidades hidrográficas que para el caso de aguas subterráneas presenta 16 provincias hidrogeológicas con un total de 61 sistemas acuíferos

identificados. Las provincias se clasificaron en tres grandes grupos: Provincias hidrogeológicas costeras e insulares, Provincias hidrogeológicas pericratónicas (PP) y Provincias hidrogeológicas montanas e intramontanas (PM) (Figura 8). En esta última categoría se encuentran provincias dentro de regiones de alta montaña donde se destaca el sistema de la provincia hidrogeológica de la Cordillera Oriental (SIAC, n.d.).

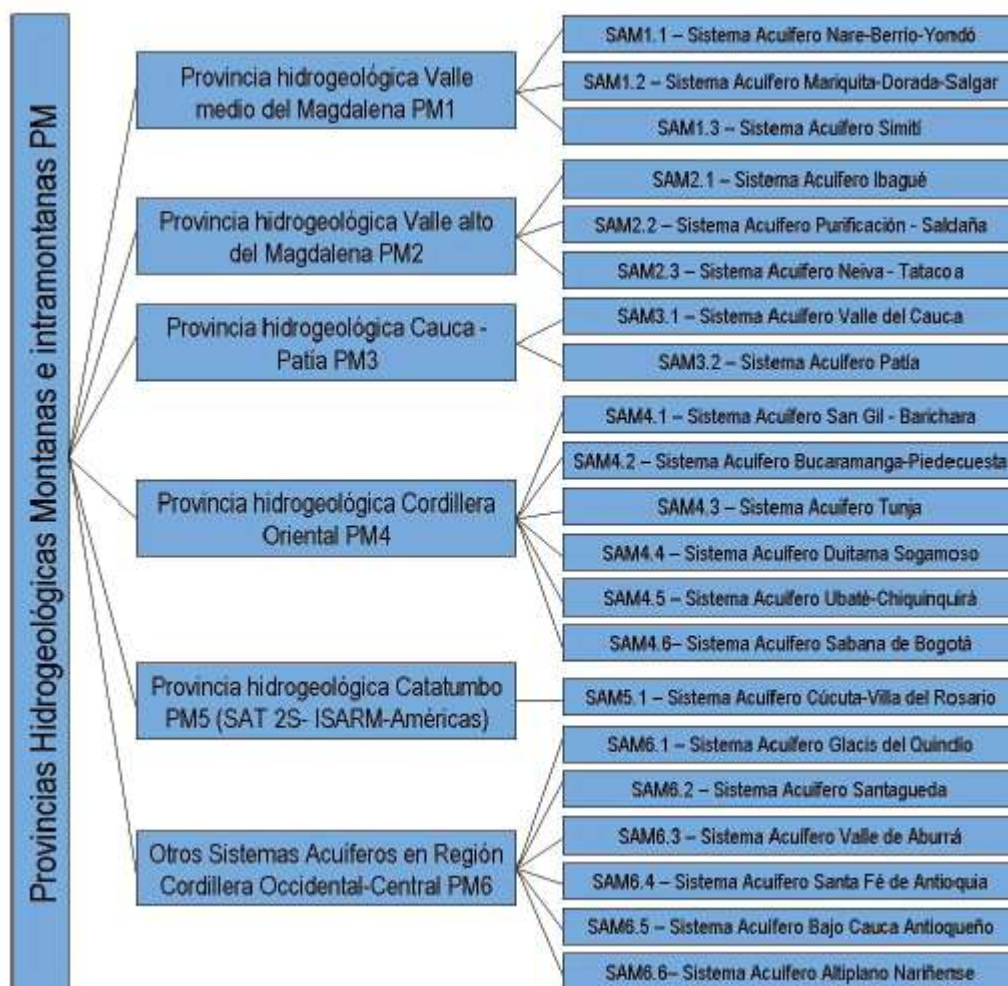


Figura 8. Sistemas acuíferos de las provincias hidrogeológicas montanas e intramontanas

Fuente: (SIAC, n.d.)

Sin embargo, el monitoreo de aguas subterráneas en alta montaña es muy escaso, por lo que una de las recomendaciones que se hace desde el Protocolo De Monitoreo Hidrológico en Páramos (García, 2018) y que se reitera en el presente documento, es incluir puntos de monitoreo de esta red, en ecosistemas por encima de los 2800 m s.n.m.

3.7.4. Monitoreo iMHEA

Para incrementar el conocimiento de los procesos hidrológicos en los ecosistemas andinos y, en particular sobre los impactos del uso de la tierra sobre la regulación de caudales, varias instituciones han conformado la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA) basada en una colaboración activa y coordinada entre centros de investigación, gobiernos locales, nacionales y regionales, y organismos no gubernamentales (Céleri et al., 2012).

La iMHEA reconoce el rol de las autoridades de agua e institutos nacionales de hidrología y meteorología como los rectores de la temática hídrica en cada uno de sus países. Complementario a los esfuerzos nacionales de generación de información, las instituciones de la sociedad civil pueden contribuir a escala local al monitoreo de microcuencas y en las cabeceras de las cuencas que son las fuentes de agua.

En esta línea, la iMHEA prioriza realizar un monitoreo sencillo “mínimo” en muchos sitios, que realizar monitoreos detallados en pocos sitios. Se considera que el monitoreo hidrológico “mínimo” es la medición de lluvia y de caudal a escala de microcuenca con una frecuencia de toma de datos relativamente alta, a fin de que esta información pueda ser útil para los institutos nacionales de hidrología y meteorología. Uno de los criterios de selección de los sitios es complementar los esfuerzos de estas instituciones (áreas con baja densidad de estaciones hidrometeorológicas, ecosistemas de alta montaña, etc) (Célleri et al., 2012).

Adicionalmente, la información generada a nivel local puede ser usada para llegar a conclusiones regionales sobre la hidrología. De esta forma, el sistema de monitoreo procura garantizar la generación de datos a mediano y largo plazo que permitan analizar cambios temporales y aporten información para la gestión de los recursos hídricos a nivel regional y de forma sostenida.

El umbral de entrada para los socios locales hacia la iMHEA es relativamente bajo y accesible. El sistema de monitoreo debe considerar un arreglo institucional que garantice la calidad y que incluya a las organizaciones y comunidades locales con diferentes especialidades y funciones en el área de influencia. El monitoreo participativo que se plantea en cada sitio de la iMHEA es ejecutado por socios locales, que pueden ser apoyados por ONG's, universidades y grupos de investigación, gobiernos e institutos nacionales, con el soporte técnico de la iMHEA (Rodríguez-Morales et al., 2019). Se considera que la participación local y su experiencia previa en estos tipos de procesos son factores críticos para el éxito de los sitios de monitoreo, y la interacción y compromiso de todas estas organizaciones garantizan la sostenibilidad del sistema. La vinculación de grupos de investigación especializados permite garantizar la rigurosidad científica de la información generada.

En Colombia la iMHEA cuenta con estaciones ubicadas en el Complejo de páramo de Guantiva-La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia (iMHEA, n.d.). El sitio tiene ocho microcuencas monitoreadas, en donde el objetivo es evaluar los servicios ecosistémicos hídricos del ecosistema de páramo muy húmedo. Las instituciones socias del proyecto son la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en el marco del proyecto Paraguas.

3.7.5. Iniciativas de monitoreo afines

Se consideran estrategias de monitoreo afines, aquellas en las que se toman medidas relacionadas con aspectos del balance hidrológico. De particular relevancia resultan las de carbono, vegetación y suelos. En el primer caso, el contenido de carbono en suelos en ecosistemas de páramo es un signo de la capacidad de regulación hidrológica. Para el caso de vegetación, el monitoreo puede aportar información relevante para analizar la incidencia de la evaporación, la transpiración y la intercepción de la niebla, cuya importancia hidrológica se discutió previamente (secciones 3.5.7 y 3.5.8). La Tabla 8 presenta las principales iniciativas de monitoreo afines con medición periódica.

| Programa | Institución | Variables | Sitios |
|---|---|--|--|
| Monitoreo de biomasa y carbono en ecosistemas de alta montaña | IDEAM, Universidad Javeriana y Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín) | Carbono en biomasa y suelos, descomposición, respiración, producción de hojarasca | Chingaza, PNN Los Nevados |
| Inventario Forestal Nacional | IDEAM | Datos dasométricos, detritos de madera, carbono en biomasa y suelos, propiedades edáficas | Nacional |
| Seguimiento de la dinámica de bosques andinos | Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín) | Datos dasométricos, carbono en biomasa y suelos, propiedades edáficas | Antioquia, Cordillera Central |
| Poleka Kasue | EIA - MRI | Temperatura, Humedad, almacenamiento de carbono, dinámica de vegetación | PNN Los Nevados cuenca de Rio Claro |
| Experimento de calentamiento de páramos | Universidad de los Andes | Microclima, PNN y fotosíntesis, descomposición y respiración edáfica | Cucuy, Chingaza |
| Seguimiento de robledales en un gradiente de elevación | Fundación Natura y Universidad Distrital | Fitodiversidad, Datos dasométricos, carbono en biomasa, densidad madera y densidad funcional | Cordillera Oriental, Cuenca rio Guacha |

Tabla 8. Iniciativas de monitoreo afines al componente hidrológico

Fuente:(IDEAM et al., 2018)

Otro tipo de áreas de monitoreo relacionadas son aquellas para las cuales la información del balance hídrico es relevante, en este caso se tiene las iniciativas de monitoreo de calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, y el monitoreo de sedimentos en cuerpos lóticos y lénticos.

3.7.6. Protocolos de monitoreo hidroclimático

La Tabla 9 presenta las escalas de trabajo, los objetivos y aspectos clave de algunos de los protocolos de mayor interés para la EMA-LHC. Se identificaron protocolos de instituciones con amplia experiencia en monitoreo que permitieran miradas complementarias gracias a sus características diferenciales en temas de escalas, ecorregiones de aplicación y énfasis en lo comunitario/participativo. Para la escala local (cerca a la de paisajes) se destacan los protocolos de WCS en Colombia y de CONDESAN para los Andes (iMHEA). Para la escala regional (complejos) y nacional se utilizaron protocolos del Instituto Humboldt y el IDEAM.

| Protocolo | Objetivos | Aspectos clave del protocolo |
|---|---------------------------------|---|
| EMA Escala: Paisaje Aplicación: Ecosistemas de alta montaña Entidades asociadas: IDEAM, Instituto Humboldt, CONDESAN | Objetivos específicos de la EMA | Enfoque integrado, institucional y participativo, hacia el conocimiento de variables respuesta (ej. servicios ecosistémicos como oferta hídrica y regulación hídrica) y determinación de impactos causados por diferentes factores de cambio. |

| | | |
|---|--|---|
| <p>Protocolo para el monitoreo hidrológico de páramos Escala: complejos, paisajes y ecosistemas. Aplicación: Complejos de páramos a nivel nacional Entidades Asociadas: Instituto Humboldt</p> | <p>Estimar los impactos de cambios en coberturas sobre la oferta hídrica</p> <p>Aportar información para mejorar la representación del balance hidrológico en ecosistemas de páramo.</p> <p>-Integrar el monitoreo hidroclimático con la componente de calidad del agua</p> | <p>-Enfoque a la valoración de servicios ecosistémicos de provisión de agua y regulación hídrica</p> <p>-Presenta herramientas (isotopía e hidro química) para el monitoreo de variables más detalladas del balance hidrológico (flujos aguas subterráneas)</p> <p>-Integra elementos de monitoreo de la calidad del agua mediante bioindicadores.</p> <p>-Aborda algunos aspectos de la integración entre escalas de paisaje y complejo</p> <p>-Gradualidad/Avance progresivo en el desarrollo de la estrategia de monitoreo.</p> <p>-Incorpora aspectos de las principales políticas y lineamientos en áreas ambientales, de ordenamiento territorial y de implementación del proceso de paz</p> <p>-Contenidos recurrentes como identificación de variables, selección de sitios de monitoreo, presentación de modelos hidrológicos, metodologías de monitoreo, equipos, materiales, gestión de datos e integración con sistemas de información ambiental.</p> |
| <p>Protocolo hidrológico para medir el impacto de las intervenciones del fondo del agua por la vida y la sostenibilidad Escala: Subzona hidrográfica Aplicación: Subzonas hidrográficas aferentes al río Cauca en el Valle del Cauca</p> | <p>Establecer las herramientas necesarias para evaluar los cambios causados por las intervenciones de conservación y recuperación en las cuencas objeto del proyecto.</p> <p>Integrar el monitoreo hidroclimático con las componentes de calidad del agua y transporte de sedimentos</p> | <p>-Enfocado en el establecimiento de impactos de medidas de intervención conservación y recuperación de ecosistemas, y a la valoración de servicios ecosistémicos de provisión de agua, regulación hídrica, calidad de agua y transporte de sedimentos.</p> <p>- Contenidos recurrentes como: Identificación de variables, selección de sitios de monitoreo, metodologías de monitoreo, equipos, materiales y gestión de datos</p> |
| <p>Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de los ecosistemas andinos: iniciativa MHEA Escala: Local Aplicación: Ecosistemas Andinos</p> | <p>Aumentar conocimiento sobre la disponibilidad de agua y la capacidad de regulación de los ecosistemas andinos, y los efectos ocasionados en la hidrología por las distintas acciones que se realicen sobre ellos (deforestación, (re)forestación, agricultura, restauración u otras de interés)</p> <p>Identificar cambios en la hidrología debido al uso de la tierra, así como proporcionar información útil que pueda mejorar las acciones de conservación hídrica desde los actores locales</p> | <p>-Se enfoca al monitoreo participativo de zonas homogéneas de coberturas para alimentar bases de datos de información compartida que permita la estimación de impactos en áreas no monitoreadas.</p> <p>-No se orienta a la implementación de modelos hidrológicos sino al análisis y desarrollo de soluciones para problemas hídricos con actores locales.</p> <p>-Resultados en el corto plazo gracias a sus estrategias de monitoreo hidrológico mínimo (caudal + precipitación), y en cuencas pares.</p> <p>-Contenidos recurrentes: Instrumentación de cuencas para el monitoreo hidrológico mínimo, monitoreo automatizado, monitoreo manual, variables, equipos, densidad de estaciones, control de calidad y procesamiento de datos.</p> |
| <p>Propuesta de monitoreo de la adaptación al cambio climático en la alta montaña Escala: Desde parcelas, hasta complejo/subzona hidrográfica Aplicación: Alta montaña</p> | <p>Evidenciar los efectos de las medidas de adaptación sobre la hidrología de las cuencas monitoreadas.</p> | <p>-Enfoque al monitoreo participativo</p> <p>-Relación con áreas temáticas diversas</p> <p>-Aplicación de la propuesta a un caso de estudio para la escala de paisaje.</p> <p>-Contenidos recurrentes: Etapas para el desarrollo de un sistema de monitoreo, preguntas, objetivos e indicadores</p> |

Tabla 9. Síntesis de protocolos integrados a la estructura del EMA-LHC

Fuente: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

Para la EMA-LHC se realizó un análisis crítico de dichos protocolos y a partir de la identificación de sus fortalezas, se integraron ideas principales, objetivos, contribuciones particulares, lineamientos clave, aspectos estratégicos, escalas espaciales y temporales. Estos protocolos pueden consultarse de forma complementaria a la EMA-LHC en caso de que se requiere profundizar en sus aspectos clave.

3.8.ASPECTOS CRÍTICOS IDENTIFICADOS: CONVERSATORIO WEB EMA LHC

La EMA LHC se socializó con expertos en temas de monitoreo hidroclimático en el marco de un conversatorio web realizado el 11 de octubre del año 2023. Los aspectos críticos identificados durante el evento se sintetizan a continuación (Fundación IPC, SIÉ Ingeniería, CONDESAN, et al., 2023).

- Bajo número de estaciones para medición de caudales en área de alta montaña y problemas de discontinuidad o calidad en las series de datos.
- Falta de monitoreo multitemporal de suelos que permita establecer cambios en sus propiedades hidrológicas, en función de cambios de coberturas.
- Información limitada, espacial y temporalmente de dinámica de coberturas a escala 1:25.000
- Falta de monitoreo de precipitación horizontal y aguas subterráneas en alta montaña
- Necesidad de involucrar a las comunidades y proyectos de conservación, restauración y reconversión productiva.
- Mantener estándares de calidad para la información recopilada en iniciativas de monitoreo comunitario.

4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA LA ALTA MONTAÑA

En esta sección se plantea una metodología genérica para la implementación de modelos hidrológicos distribuidos, que profundiza en la etapa de recolección de información, y se ejemplifica para el caso del modelo hidrológico Tetis. Con esto se pretende facilitar el análisis comparativo entre modelos hidrológicos distribuidos desde sus requerimientos de información, para identificar las necesidades de información que permitan un mejor ajuste a las condiciones específicas de la alta montaña³. Al final, se utiliza una estrategia de cienciometría, para identificar los principales investigadores e instituciones académicas en el país, que pueden aportar al desarrollo de la modelación hidrológica en la alta montaña de Colombia.

El principal interés de la modelación hidrológica distribuida es la posibilidad de brindar estimaciones de los beneficios de las actividades de conservación, reconversión productiva y reforestación, entendidos como aumento de la oferta hídrica y la regulación hídrica, que puedan traducirse en mejores incentivos para los sistemas de pago por servicios ambientales (Ochoa et al., 2022). Actualmente los incentivos se calculan principalmente con un enfoque de costo de oportunidad, que es el valor de referencia que mide el sacrificio, la renuncia o la privación de ejecutar una actividad productiva determinada en el predio, en virtud de cumplir el objetivo de mantenimiento y la generación del servicio ambiental (MADS, 2021). Este enfoque soslaya los beneficios para el recurso hídrico.

4.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS

La Modelación Hidrológica es un enfoque científico y técnico que involucra la construcción y utilización de modelos matemáticos y computacionales para representar los procesos complejos y dinámicos del ciclo hidrológico en una determinada cuenca o sistema acuático. Estos modelos capturan las interacciones del agua proveniente de la atmósfera (lluvia, niebla, nieve), con factores del medio natural (clima, relieve, coberturas, suelos y subsuelo), permitiendo simular y predecir como principal variable de salida el caudal de una corriente hídrica, y como variables intermedias distintos flujos y almacenamientos (evaporación, intercepción de agua por la vegetación, almacenamiento superficial, escorrentía, infiltración, consumo de agua de plantas, transpiración, almacenamiento de agua en suelos, percolación, flujo subsuperficial (interflujo), almacenamiento en acuíferos y caudales base (Beven, 2012) (ver Figura 2, sección 2.2). La modelación hidrológica facilita la evaluación de escenarios futuros, la comprensión de las respuestas del sistema ante cambios ambientales, la toma de decisiones informadas para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la mitigación de riesgos relacionados con inundaciones, sequías y degradación del entorno acuático.

Existen varias tipologías de modelos hidrológicos, agregados o distribuidos, conceptuales o físicamente basados, enfocados a eventos (i.e. precipitaciones máximas), o enfocados a la evaluación del recurso hídrico

³ Por ejemplo, la metodología Corine Land Cover, con que se alimentan algunos modelos, no captura de manera apropiada la diversidad de la vegetación de estos ecosistemas.

durante períodos variables de tiempo, y combinaciones entre ellos (Singh & Frevert, 2006). Para el caso de este protocolo se incentiva el uso de modelación de tipo distribuido para evaluación del recurso hídrico, por el interés en estimar los impactos de cambios de coberturas y del clima sobre la oferta hídrica y la regulación hídrica, a una escala que implica alta variabilidad espacial de la información (secciones 3.3 y 3.4) como ocurre en el caso de un paisaje de alta montaña.

4.2.METODOLOGIA GENERAL PARA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA

Una de las dificultades de la modelación hidrológica distribuida, es el volumen de información y procesamiento requerido antes de poder obtener resultados. El diagrama de la Figura 9 sintetiza las principales etapas de la modelación hidrológica distribuida, destacando la de recolección y procesamiento de información. En esta etapa se utilizan series de variables hidroclimáticas e información espacial, representativa de los diferentes factores ambientales con que interactúa el agua. Esta información de partida es procesada para obtener la información final con que se especifican los modelos para ser corridos o evaluados. Una vez el modelo es operativo, se debe calibrar o ajustar para verificar el sentido físico de los resultados y la consistencia con la información de origen. Para constatar la capacidad del modelo ajustado se debe realizar un proceso de validación que corresponde a la comprobación del modelo ajustado, usando información diferente a la utilizada en el proceso de calibración. Una vez validado el modelo, puede utilizarse de manera predictiva, o hipotética para la modelación de escenarios, por ejemplo, ante cambios de coberturas, o incrementos en la temperatura.

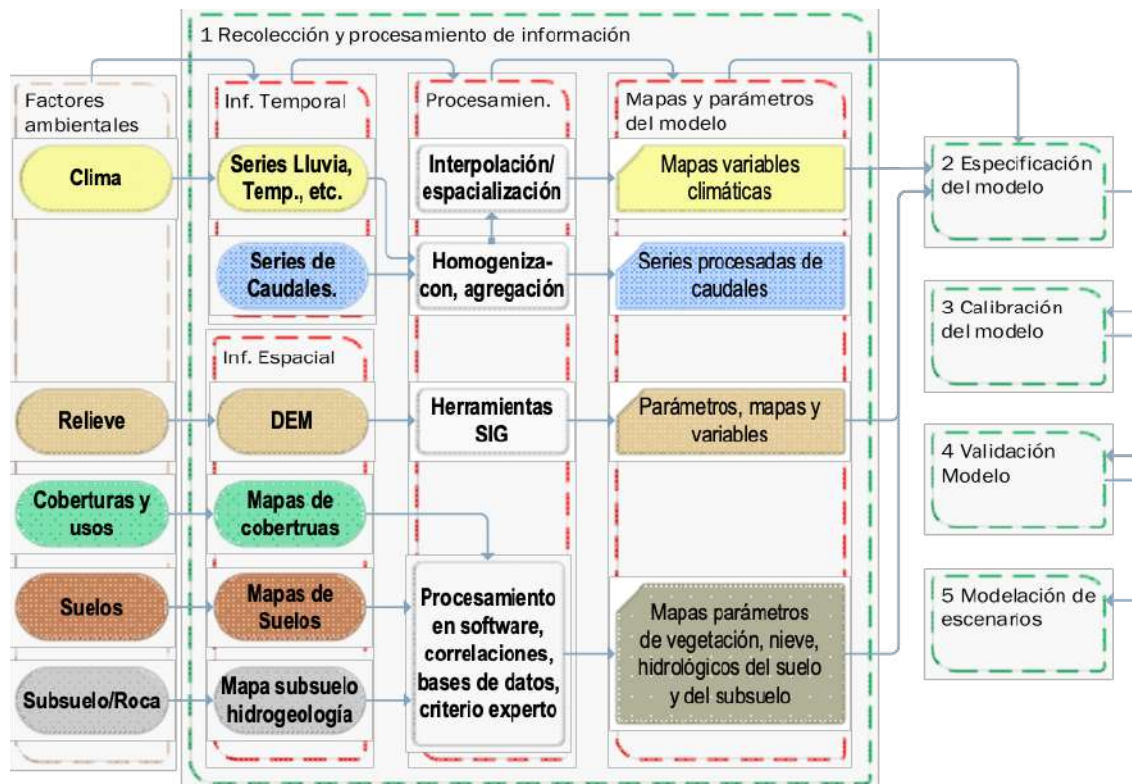


Figura 9. Síntesis metodología modelación hidrológica distribuida

Elaboración: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

En el diagrama la información de partida se presenta con relación a los factores ambientales a los que se asocia. La información hidroclimática corresponde a series temporales de variables que mínimo incluyen

precipitación, caudales y temperatura. Estas series de datos se analizan para determinar su calidad a través de procedimientos estadísticos como medidas de tendencia central y de desviación, y análisis de homogeneidad como curvas de masa residual y de masa simple (Wanielista et al., 1997). Dependiendo del modelo puede requerirse la espacialización de algunas de estas variables para lo que se utilizan estrategias como la interpolación lineal, los polígonos de Thiessen y la ponderación de acuerdo al inverso de la distancia. Algunos modelos como el Tetis, realizan estos procedimientos de manera interna (GIMHA, 2021).

La información espacial que representa los demás factores ambientales, corresponde a: i) modelo de elevación digital de terreno (DEM), ii) mapas de coberturas, iii) mapas de suelos, y iv) mapas geológicos e hidrogeológicos con diversos metadatos. El DEM se procesa con herramientas SIG para su depuración y la generación de mapas para la modelación hidrológica, como las pendientes, las velocidades en ladera, las direcciones de flujo, las áreas acumuladas etc. De los mapas de coberturas, suelos e hidrogeológicos se obtienen mapas de otros parámetros para la modelación de los flujos y almacenamientos del ciclo hidrológico. La sección 4.4 presenta una síntesis de la etapa de recolección y procesamiento de información en el caso del modelo Tetis, en donde se detallan la información de partida, intermedia y final para la especificación del modelo, y los principales procedimientos, ecuaciones, bases de datos y herramientas de procesamiento. La intención es ofrecer una herramienta sencilla de comparación entre modelos hidrológicos al menos desde la información con que se especifican los modelos. Un análisis más profundo deberá incluir la comparación de los modelos específicos para los diferentes procesos del balance hidrológico que utilizan otros modelos hidrológicos distribuidos diferentes al Tetis.

4.3.EJEMPLO: MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA CON TETIS

El modelo TETIS ha sido desarrollado para realizar la simulación hidrológica en cuencas naturales, aunque dispone de submódulos para la simulación de la fusión de la nieve, el crecimiento de la vegetación, embalses, riego agrícola y extracciones particulares. El objetivo es obtener de la mejor forma posible la respuesta hidrológica ocasionada por la precipitación de lluvia o de nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados y empleando la modelación distribuida de tipo conceptual.

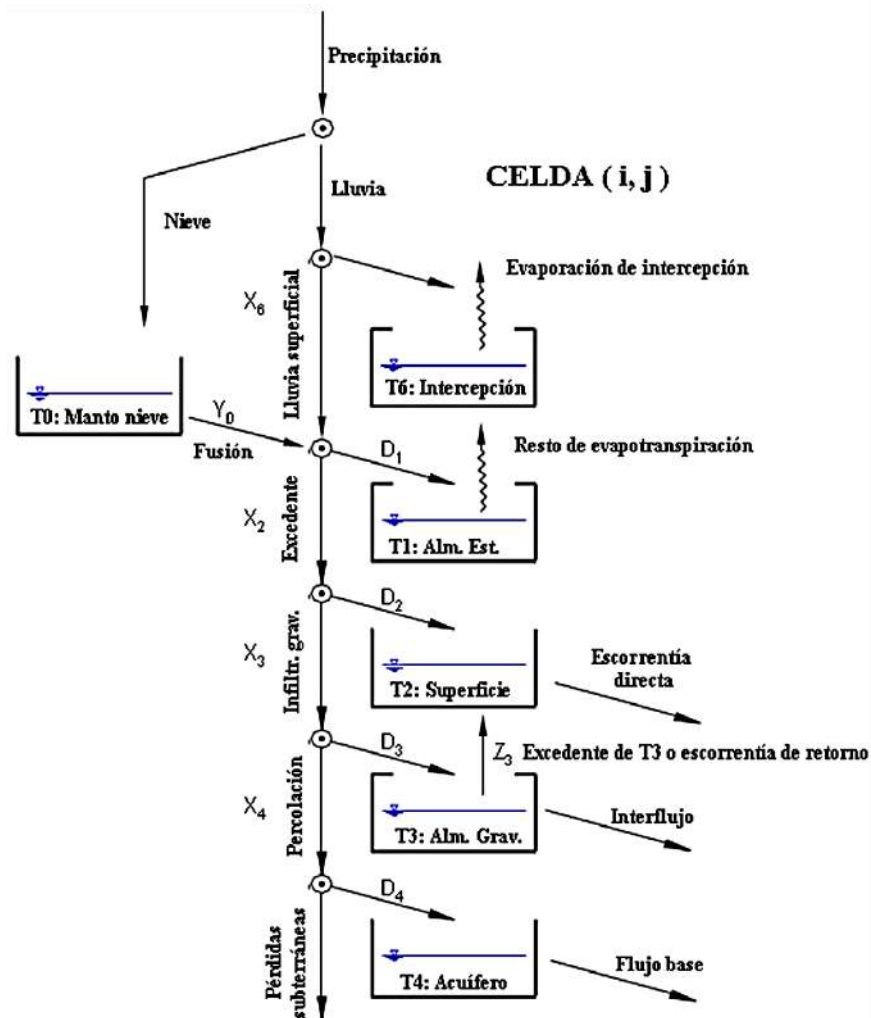


Figura 10. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS.

Fuente: (GIMHA, 2021)

En Tetis, la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí (más un séptimo de cauces cuando lo haya en la celda), como puede observarse en la Figura 10.

El flujo entre los tanques es función del agua almacenada en ellos, por lo que las variables de estado son los volúmenes almacenados en cada uno de los tanques. La función que relaciona el flujo con estas variables de estado es función del esquema conceptual adoptado, del tipo de tanque y de las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo en la misma.

En realidad, la conceptualización del modelo Tetis es una malla interconectada en tres dimensiones como se puede observar en la Figura 11. Los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo, siguiendo las direcciones del flujo propuestas por el modelo de elevación digital (DEM) hasta alcanzar la red de drenaje constituida por cárcavas y cauces. La longitud de interconexión máxima para cada tanque

es definida por el usuario, teniendo en cuenta que para la escorrentía y el flujo subsuperficial esta longitud está asociada al tamaño de las laderas. Para el flujo base esta longitud se estima teniendo en cuenta el punto inicial del flujo permanente en el cauce.

El sistema presenta tres elementos diferenciados, definidos por las áreas umbrales para que las diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie. Además, estas áreas coinciden con la presencia de una incisión permanente en el terreno en donde se concentran los flujos, ya sea en cárcavas o en cauces.

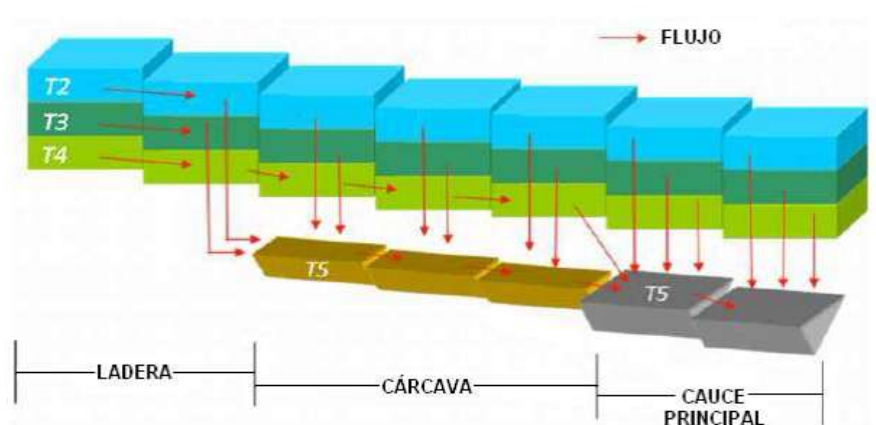


Figura 11. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS (simplificación 2D).

Fuente: (GIMHA, 2021)

4.4. SÍNTESIS RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN PARA EL MODELO TETIS

Como se mencionó en la sección 4.2, la modelación hidrológica distribuida requiere de una cantidad importante de información, tanto espacial como temporal, y un procesamiento previo de los datos para llegar a la información que requiere el modelo para correr. La Figura 12 presentan una síntesis de la etapa de recolección y procesamiento de información para el condicionamiento del modelo Tetis, estructurada de manera que facilite un análisis comparativo entre modelos hidrológicos.

Para el análisis comparativo se tienen dos categorías generales, información y procedimientos. La información puede ser de partida o general, intermedia y la final con que se condiciona el modelo. Los procedimientos pueden incluir uso de herramientas SIG, bases de datos, software, modelos o ecuaciones y criterio experto. La información de partida corresponde a datos de los factores del medio natural, que habitualmente son común denominador en modelos distribuidos de tipo conceptual y físicamente basados. Las diferencias entre modelos pueden encontrarse principalmente en los procedimientos, ecuaciones y bases de datos. Por ello el interés en identificar estos elementos para el análisis comparativo, y para la adaptación de los modelos al contexto de la alta montaña. La Tabla 10 resume los procedimientos para el modelo Tetis.

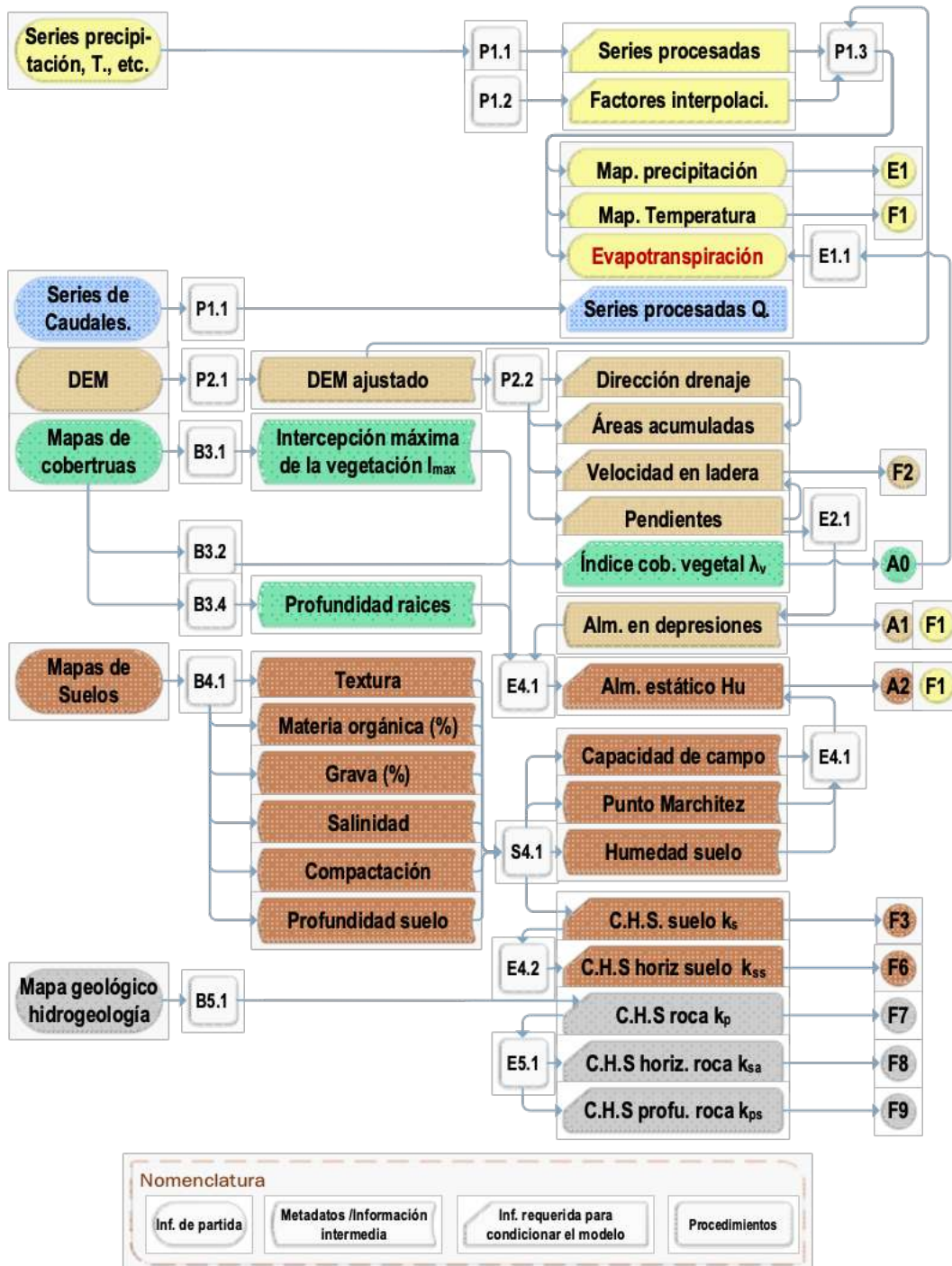


Figura 12. Síntesis etapa de recolección y procesamiento de información para el modelo TETIS

Elaboración: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

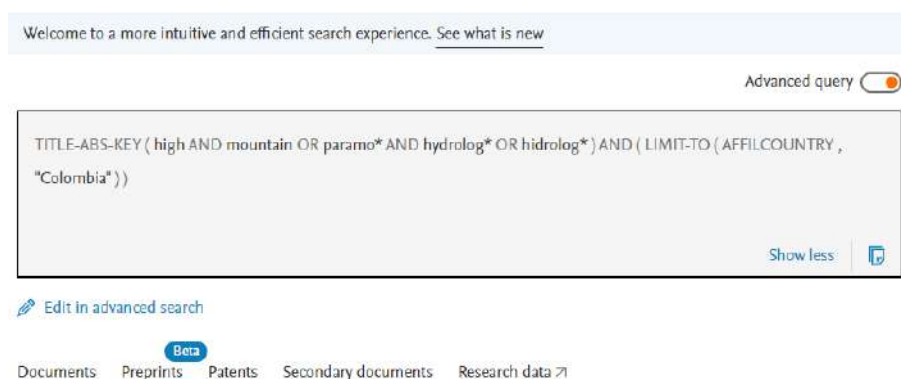
| Proceso | Descripción general |
|---------|---|
| P1.1 | <p>Calidad de las series: El análisis de calidad de la información busca identificar posibles patrones, tendencias, ciclos o anomalías en los datos. Para ello se utilizan herramientas estadísticas como medidas de tendencia central, dispersión, asimetría y correlación, así como pruebas de consistencia y homogeneidad a través de herramientas como curvas de masa residual, doble masa y masa simple.</p> <p>Agregación de series: Es el proceso de producir series de tiempo de precipitación o caudales a diferentes resoluciones temporales, por ejemplo, diarias, mensuales o anuales, a partir de series con información de mayor frecuencia</p> |
| P1.2 | <p>Parámetro interpolación de la lluvia: Se utiliza un parámetro β, para tener en cuenta la correlación de la variable con la altura. En ecosistemas de alta montaña, el parámetro puede ser negativo en caso de existir un óptimo pluviométrico.</p> <p>Parámetros de interpolación de la temperatura: En general la temperatura presenta una reducción a medida que incrementa la altura (sección 3.5.1)</p> |
| P1.3 | El modelo TETIS tiene subrutinas con la que se obtienen los mapas de variables espacializada como precipitación, temperatura evapotranspiración potencial y altura equivalente de agua inicial en el módulo de fusión de nieve. Para los mapas de lluvia y temperatura las entradas al modelo son las series temporales y los parámetros de interpolación. La interpolación se realiza por el método del inverso de la distancia al cuadrado. |
| E1.1 | La evapotranspiración es un flujo calculado que corresponde a la evaporación del almacenamiento en las hojas sumado a la transpiración, y depende de múltiples variables y parámetros. También puede obtenerse de datos de estaciones en campo, pero son muy escasas. Regularmente se utiliza la ecuación de Penman Montheit, y las recomendaciones de la FAO: Estudio FAO riego y drenaje: No. 56: "Evapotranspiración de cultivo". |
| P2.1 | Regularmente los DEM se procesan para corregir vacíos y errores y alterar los mapas de acumulación de flujo que definen los cauces. En ArcGis se utiliza la opción DEM Manipulation de la herramienta ArcHydro. En QGIS puede utilizarse el módulo GRASS |
| P2.2 | Para la generación de mapas derivados del DEM, puede utilizarse el módulo Spatial Analyst en ArcGIS y el menú Raster / Análisis en QGIS |
| E2.1 | El almacenamiento en depresiones, depende directamente del porcentaje de pendiente del terreno (mapa de pendientes). Puede obtenerse a través de expresiones en función de la pendiente, o con herramientas SIG como el módulo GRASS de QGIS. La referencia (Calderon & Lemus, 2016) propone la expresión: <p style="text-align: center;">$A_{charcos} = 10 - 130i \quad i < 0.075$</p> |
| B3.1 | Valores recomendados en fuentes bibliográficas (Pearce et al., 1980) |
| B3.2 | Valores recomendados en fuentes bibliográficas (Burman & Pochop, 1994) |
| B3.3 | Valores recomendados en fuentes bibliográficas (Calderon & Lemus, 2016) |
| B4.1 | Metadatos mapas de suelos |
| E4.1 | El almacenamiento estático dependa de múltiples variables algunas de las cuales requieren del uso de bases de datos (B3.4) y software (S4.1). La referencia (Calderon & Lemus, 2016) plantea la siguiente expresión <p style="text-align: center;">$H_u = Alm. Sup. + AWC_{TOP} * MIN(Prof. Raíces; ROO)$</p> |
| S4.1 | Generalmente se utiliza el software SPAW del departamento de agricultura de los estados unidos, que utiliza variables de propiedades del suelo. |
| E4.2 | Puede obtenerse de criterio experto, datos de campo o asumiendo un suelo isotrópico ($k_{ss}=k_s$) |
| B5.1 | Mapas geológicos e hidrogeológicos y criterio experto |
| E5.1 | Se obtienen de criterio experto, o bajo las siguientes suposiciones generales: $K_p=K_{sa}$ y $K_{ps}= 0.1K_p$ |

Tabla 10. Síntesis de herramientas, bases de datos, modelos y ecuaciones para la especificación del modelo TETIS
Elaboración: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

Teniendo en cuenta el análisis anterior, el modelo Tetis puede lograr un mejor ajuste a las condiciones de alta montaña, si se cuenta con datos específicos de interceptación de vegetación, de profundidad de raíces, y de índice de cobertura vegetal, para las coberturas típicas de bosque alto andino y de páramos. También es de interés el estudio de la dinámica de la precipitación para determinar la ocurrencia de un factor de interpolación negativo, situación que se da a alturas donde se supera el óptimo pluviométrico.

4.5. ENTIDADES ACADÉMICAS Y/O INVESTIGATIVAS CON PUBLICACIONES EN TEMÁTICAS DE HIDROLOGÍA EN ALTA MONTAÑA EN COLOMBIA

Para indagar las instituciones en Colombia con investigaciones en hidrología en alta montaña, que pueden aportar en aspectos de modelación hidrológica, se utilizó una estrategia de ciencia métrica utilizando la plataforma SCOPUS, que cuenta con acceso a una extensa base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas. Se formuló una ecuación de búsqueda simple limitada para Colombia (Figura 13) que incluyó términos en español e inglés truncados para tener en cuenta variaciones como hydrology o hydrological.



53 documents found

Figura 13. Ecuación de búsqueda para indagación de instituciones con investigaciones en hidrología en alta montaña

Fuente: SCOPUS

Los resultados de la búsqueda arrojaron 53 publicaciones desde el año 1997 a noviembre del 2023 donde se destacan los autores e instituciones que se presenta en la Figura 14 y la Figura 15.

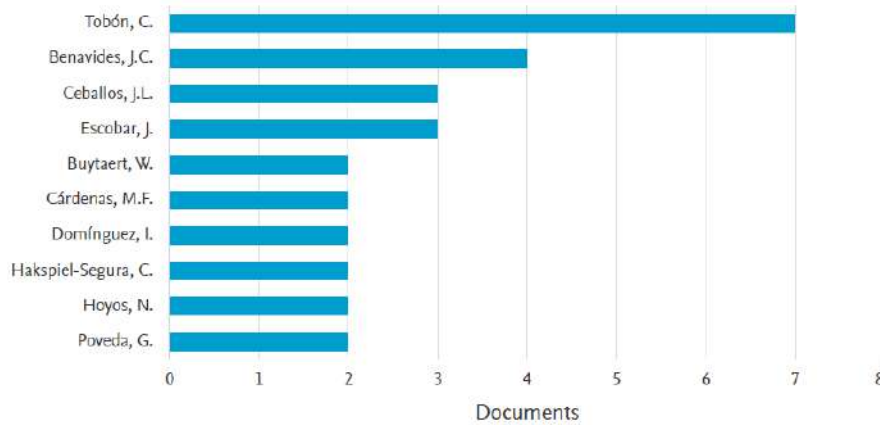


Figura 14. Investigadores en temas de hidrología de alta montaña en Colombia

Fuente: SCOPUS

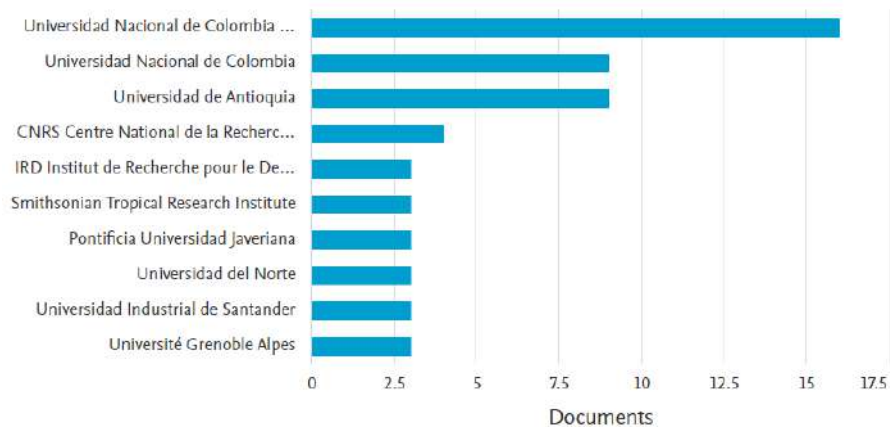


Figura 15. Instituciones en temas de hidrología de alta montaña en Colombia

Fuente: SCOPUS

Otras universidades de Colombia señaladas en la búsqueda fueron: La Universidad de los Andes, La Universidad del Tolima, La Universidad del Valle, la Universidad Jorge Tadeo Lozano, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, la Universidad Distrital, La Universidad de Caldas, La Universidad del Quindío y la Escuela de Ingeniería de Antioquia. Estos autores e instituciones constituyen un importante referente para el desarrollo de futuras ventanas de observación de la EMA-LHC en el país, que aprovechen las temáticas objeto de investigación y el conocimiento generado en las regiones.

5. MARCO CONCEPTUAL DEL MONITOREO EN ALTA MONTAÑA

Desde el punto de vista conceptual, este protocolo conserva el enfoque analítico de la EMA de articulación de escalas espaciales y de conexión de variables de múltiples áreas temáticas, a través de preguntas o hipótesis sobre las relaciones causa efecto, que dan cuenta del comportamiento del socioecosistema de alta montaña y su respuesta a diferentes tipos de cambios. De manera simplificada las variables se categorizan como factores de cambio y variables respuesta, y las escalas espaciales se clasifican en internacional, nacional, complejos de páramos, paisaje y en el mayor detalle como ecosistemas/parcelas. Para una descripción más específica del modelo conceptual general puede consultarse la propuesta de la EMA (IDEAM et al., 2018), y para la escala de paisaje el RED Rio Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

Para el caso de este protocolo se toma como referencia la escala de paisaje hidrográfico de alta montaña, que mantiene la misma noción de paisaje de la EMA, pero con la particularidad de que debe asociarse a una región hidrográfica que facilite el alcance de objetivos vinculados a balances hídricos en unidades hidrográficas. Por lo general, un paisaje hidrográfico de alta montaña, estaría compuesto por una o más microcuencas que de manera individual o agrupadas tienen un cierre hidrológico cerca de la cota de los 2800 m.s.n.m. como en el caso del área de estudio del RED Rio Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

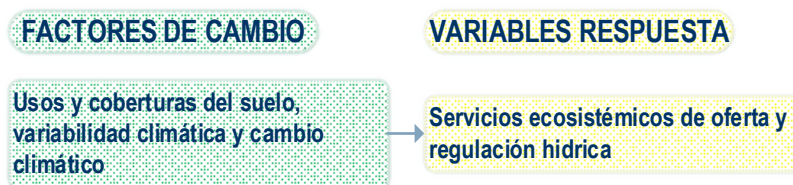


Figura 16. Síntesis factores de cambio y variables respuesta EMA-LHC

Fuente: Adaptado de la EMA (IDEAM et al., 2018)

Los factores de cambio considerados en este protocolo son los cambios en los usos y coberturas del suelo, la variabilidad climática y el cambio climático (Figura 16). Los cambios asociados al clima se expresan comúnmente en términos de cambios observables en la precipitación y la temperatura, de corto y mediano plazo para la variabilidad climática (variaciones estacionales, fenómenos ENSO) y de largo plazo para el cambio climático (décadas o más). Respecto los cambios en coberturas, pueden ser de origen antrópico, climático o una combinación de ambos. Ejemplos del primer caso son la deforestación de bosques naturales para el uso pecuario, o la implementación de sistemas silvopastoriles para el mejoramiento de prácticas agrícolas; Como ejemplo del segundo caso puede mencionarse la colonización de especies de bosque en zonas más altas debido al aumento de la temperatura. La Figura 17, sintetiza los principales procesos de cambio a escala de paisaje, asociados a la intervención antrópica y al clima (IDEAM et al., 2018).

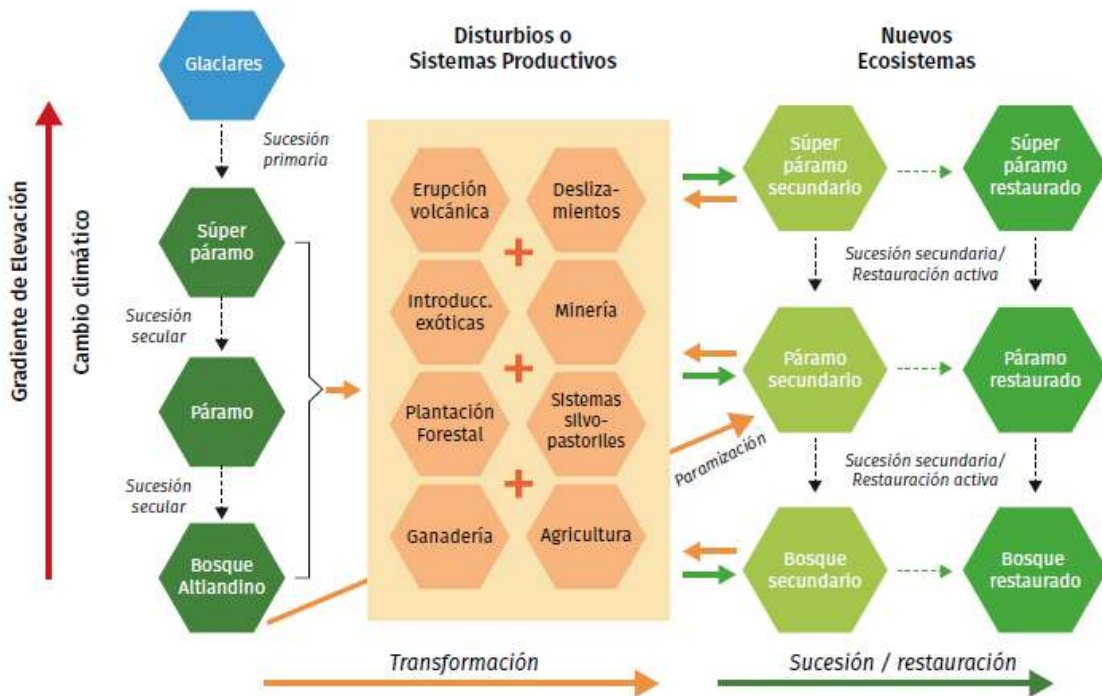


Figura 17. Principales ecosistemas altoandinos y sistemas de reemplazo a lo largo de gradientes de elevación y gradientes de transformación/sucesión

(Las flechas punteadas indican procesos de cambio vinculados al cambio climático y el desplazamiento de los ecosistemas a lo largo del gradiente de elevación (p. ej. remplazo de páramos por bosques altoandinos o fitocolonización en áreas de retroceso glaciar). Las líneas naranjas indican disturbios o procesos de cambio generados por diversos sistemas de manejo. Las líneas verdes señalan procesos de sucesión/regeneración natural o asistida).

Fuente: EMA (IDEAM et al., 2018)

En cuanto a variables respuesta, este protocolo considera principalmente la oferta hídrica y la regulación hídrica (Figura 16), y algunos de sus procesos y variables intermedias. Para el caso de paisajes con alta intervención antrópica el impacto en las variables respuesta está dominado por los cambios en los usos y las coberturas (Cusgüen et al., 2021). Mientras que los factores climáticos tomarán relevancia en paisajes poco transformados, o en las franjas altitudinales de escasa intervención como zonas glaciares y periglaciares (Figura 3).

Para la escala de paisaje, el análisis de la información se realiza en función del gradiente de elevación (cambio en la altitud), por la relación que presenta con una importante cantidad de variables, procesos y parámetros del ciclo hidrológico (sección 3.5). Sin embargo, en términos prácticos, el gradiente de elevación o las franjas altitudinales, solo se utilizan como una forma sintética y agregada de presentar la información de monitoreo hidrológico en la escala de paisaje. Lo anterior debido a que la mayor parte de las variables se trabajan de manera espacializada, como lo demanda el uso de modelos hidrológicos distribuidos y el análisis comparativo de información de diferentes regiones de alta montaña, que deberá estar especificada a nivel de ecosistemas, parcelas, tipologías de suelos, u otro tipo de unidades de mayor detalle para que facilitar su comparación. Escalas de detalle demasiado amplias no permiten observar la diversidad de condiciones hidrológicas y sus interrelaciones en la alta montaña.

6. MARCO ESTRATÉGICO

GENERAL DE LA EMA LHC



La sección de marco estratégico parte de los objetivos de la EMA adaptados a la componente hidroclimática, y propone unos lineamientos generales para el planteamiento de objetivos a escala de paisaje y para el diseño del sistema de monitoreo hidroclimático, profundizando en el monitoreo comunitario y en la conexión con las escalas espaciales de la EMA. Los objetivos a escala de paisaje se formulan teniendo en cuenta la información disponible de variables de monitoreo, mientras incorpora los intereses de los actores potenciales y los lineamientos definidos previamente.

Consistentemente con su modelo conceptual, en este protocolo se plantean objetivos⁴ que relacionan los factores de cambio y las variables de salida mencionadas en la sección anterior, y que conectan la escala de paisaje hidrográfico con las demás escalas espaciales. Dentro de la escala de paisaje hidrográfico, se busca la integración de las comunidades locales, y se plantean objetivos asociados con la variabilidad espacial de las variables del ciclo hidrológico, que implican una mayor escala de detalle y por tanto el establecimiento de conexiones con variables y procesos a escala de ecosistemas/parcelas.

Puesto que el ciclo hidrológico comprende variables y parámetros de diferentes áreas temáticas como, clima, suelos, vegetación, y su impacto en servicios ecosistémicos, es claro que el protocolo también debe incluir objetivos que relacionan variables de diferentes áreas de monitoreo, y que involucran el hacer de los habitantes de la alta montaña, que finalmente son quienes tienen mayor capacidad de transformar el paisaje habitado.

Los principios orientadores para cada ventana de monitoreo dependerán de los intereses de los promotores de la iniciativa y de las características del paisaje hidrográfico en particular, por lo que en este protocolo nos limitamos simplemente a enunciar algunos de dichos principios. Sin embargo, desde lo estratégico se presentan objetivos de alcance inmediato, de alcance cercano, y subsecuentes.

6.1.OBJETIVOS GENERALES DE LA EMA LHC

Para el establecimiento de los objetivos generales del protocolo, se partió de los objetivos generales de la EMA (IDEAM et al., 2018), de los objetivos establecidos en el PMIP-AM (IDEAM, 2022b) para la componente hidroclimática, y se incluyeron un objetivo adicional alcanzable mediante modelación hidrológica distribuida, y otro asociado a los tomadores de decisiones. Teniendo en cuenta dichos referentes y el marco conceptual de la sección 5, los objetivos generales para la escala de paisaje hidrográfico se enuncian de la siguiente forma:

⁴ No se presentan preguntas de monitoreo para evitar redundancias, ya que estas pueden ser fácilmente enunciadas como objetivos.

- Evaluar el estado actual y la dinámica de los servicios ecosistémicos de oferta y de regulación hídrica.
- Evaluar las relaciones de la dinámica de la oferta y la regulación hídrica con los cambios en los usos y coberturas del suelo, y con el cambio climático y la variabilidad climática.
- Evaluar el impacto de estrategias de conservación, restauración ecosistémica o reconversión productiva en la dinámica de la oferta y la regulación hídrica.
- Implementar modelos hidrológicos distribuidos que permitan estimar el impacto sobre la dinámica de la oferta y la regulación hídrica causado por diferentes escenarios de cambio de coberturas y cambio climático.
- Orientar los procesos de toma de decisiones a diferentes escalas utilizando el conocimiento adquirido (mediante monitoreo directo o estimados por modelación hidrológica) de la dinámica de la oferta y de la regulación hídrica, y su relación con diferentes factores, escenarios de cambio y estrategias de manejo.

6.2.LINEAMIENTOS GENERALES

Enfoque al entendimiento de las relaciones variables respuesta – factores de cambio

Siguiendo el marco conceptual de la EMA (sección 5), este protocolo se enfoca en el entendimiento de las relaciones entre la oferta y la regulación hídrica como variables respuesta, y los cambios en usos y coberturas, y el cambio y la variabilidad climática como factores de cambio. Los cambios en usos y coberturas tienen una fuerte incidencia de actividades antrópicas, donde resulta clave el papel de las comunidades y del monitoreo participativo.

Fomento a la modelación hidrológica distribuida

Este protocolo recomienda la modelación hidrológica distribuida como una estrategia para profundizar en el conocimiento científico de los ecosistemas de alta montaña, conectar los factores de cambio y las variables respuesta en el área hidroclimática, y fomentar los esquemas de pago por servicios ambientales (PSA). Por medio de la modelación hidrológica, se conectan actores científicos, iniciativas de monitoreo y diferentes escalas de trabajo, que dinamizan el monitoreo de los ecosistemas de alta montaña. En esta publicación, la sección 4.2 presenta un análisis simplificado de la etapa de búsqueda y procesamiento de información para modelos hidrológicos y la sección 4.4 el ejemplo para condicionar el modelo Tetis, que puede replicarse para otros tipos de modelos hidrológicos distribuidos. La sección 8 incluye los resultados principales de la implementación del modelo Tetis para el caso de estudio de la cuenca de alta montaña de Rio Claro (Villamaría – Caldas).

Orientación a la recopilación de la mejor información disponible

La EMA-LHC más que una guía exhaustiva para el desarrollo de los objetivos de un programa de monitoreo hidroclimático, presenta una serie de fundamentos conceptuales (secciones 2.2, 2.3 y 5), lineamientos, metodologías (secciones 7.3.5 y 7.3.6), referencias y fuentes de información rigurosas (sección 7.1), para orientar el diseño de programas de monitoreo hidroclimático que se ajusten a intereses y objetivos diversos en la escala de paisaje, permitiendo a su vez conectarse con múltiples escalas.

Implementación de forma secuencial o gradual

El monitoreo hidroclimático es un esfuerzo a largo plazo que puede ser implementado de forma gradual, partiendo de los objetivos alcanzables más fácilmente con los recursos disponibles, y avanzando hacia objetivos de mayor complejidad o que requieren el monitoreo de nuevas variables (ver sección 6.5 y Figura 18). En cada caso deberán evaluarse compromisos entre el impacto sobre el balance hídrico de la variable a

evaluar, y la dificultad o costos para su medición. El impacto de la variable sobre el balance hídrico estará mediado por las características del paisaje de estudio. Por ejemplo, el monitoreo isotópico para estimación de flujos de agua subterránea será de bajo impacto en paisajes con escasa incidencia de acuíferos profundos, pero tendrá alta relevancia en caso contrario (ver Tabla 12, sección 6.5).

Trabajo conjunto con las comunidades locales

La EMA y este protocolo reconocen la necesidad de trabajar conjuntamente con el habitante de alta montaña para la implementación de sus estrategias de monitoreo. En el caso del monitoreo hidroclimático la participación de la comunidad es de especial interés, pues les involucra como beneficiarios de los servicios ecosistémicos de oferta y regulación hídrica, y como factores de cambio desde los usos del suelo, las transformaciones en coberturas, y el desarrollo o colaboración en estrategias de conservación, restauración ecológica, reconversión productiva entre otros. Las secciones 6.3 y 7.3.1 presentan lineamientos, recomendaciones y referencias para el monitoreo comunitario participativo, clave en la conexión con las escalas de complejos de páramo, y de parcelas.

Profundización del conocimiento de los componentes del ciclo hidrológico en la alta montaña colombiana

Para tener una comprensión más precisa del ciclo hidrológico en la alta montaña, que brinde información más confiable para la implementación de modelos hidrológicos y el desarrollo de estrategias de manejo, se propone profundizar en áreas poco estudiadas asociadas a variables y procesos como:

- Regulación hídrica de glaciares (sección 3.5.5)
- Precipitación horizontal / interceptación vegetación (sección 0)
- Regulación hídrica de suelos (sección 3.5.9)
- Regulación hídrica de lagunas, humedales y turberas (sección 3.5.10)
- Aguas subterráneas (sección 3.5.11)

Implementación en zonas que ya cuenten con alguna iniciativa de monitoreo

Dentro de los fundamentos de la EMA, se propone partir de las iniciativas de monitoreo existentes para la integración en un sistema de monitoreo integrado. Para el caso de este protocolo, esta afirmación implica la priorización de dos tipos de escenarios:

- Paisajes hidrográficos de alta montaña donde ya existan monitoreo de variables hidroclimáticas, resultando clave la presencia de estaciones de monitoreo que cuenten con series multitemporales de niveles o caudales, que posibiliten la implementación, calibración y validación de modelos hidrológicos distribuidos.
- Paisajes hidrográficos de alta montaña que cuenten con iniciativas de monitoreo participativo, de bosques o carbono, o que cuenten con iniciativas de restauración o reconversión de procesos productivos, y que puedan ser complementadas con monitoreo hidroclimático para conectar los servicios ecosistémicos con cambios en usos, coberturas y estrategias de manejo o adaptación.

Recuperación de estaciones de monitoreo

Debido a las limitaciones en el monitoreo hidroclimático en Colombia, se recomienda que las nuevas iniciativas de monitoreo identifiquen estaciones en mantenimiento e inactivas para iniciar acciones de intermediación para su recuperación. El Anexo I presenta las estaciones del IDEAM en estas condiciones, para estudiar su intervención prioritaria, por la importancia que representan los ecosistemas de alta montaña para la conservación del recurso hídrico del país.

Priorización de experiencias locales/regionales para modelación y monitoreo

Para la implementación de nuevas ventanas de monitoreo, se recomienda aprovechar el conocimiento y experiencias locales y regionales que, además ofrecen la ventaja de fortalecer los procesos de gobernanza (secciones 4.5 y 7.3.1).

Conexión con otras escalas espaciales

Siguiendo el marco conceptual de la EMA, este protocolo presenta elementos de conexión que lo vinculan con la escala internacional, nacional, de complejos de páramo y de ecosistemas/parcelas (sección 6.4)

Conexión con otras áreas de monitoreo

La conexión con diferentes escalas, el trabajo conjunto con comunidades y las variables y procesos del ciclo hidrológico asociados a diferentes temáticas, requiere de la EMA-LHC un enfoque interdisciplinar que integre múltiples áreas de conocimiento, y en este sentido múltiples áreas de monitoreo (sección 3.7.5). De particular relevancia resulta en este punto, el monitoreo periódico de coberturas en ecosistemas de alta montaña a escala 1:25000.

6.3. MONITOREO PARTICIPATIVO

La EMA, en su modelo conceptual tiene como unidad genérica de análisis el socioecosistema, debido a la interdependencia del medio natural y el medio social, ya que las actividades antrópicas se consideran factores de cambio de las principales variables de salida del sistema, como la biodiversidad el contenido de carbono y los servicios ecosistémicos, que a su vez impactan la calidad de vida de las comunidades (IDEAM et al., 2018). En este sentido el habitante de la alta montaña puede jugar diferentes roles dentro de la EMA: i) como factor de cambio en la transformación del paisaje a través de la ocupación del territorio y de la realización de actividades de subsistencia, productivas, de conservación, de restauración, etc., ii) como actor impactado por las actividades antrópicas realizadas por sí mismo o por terceros, iii) o como beneficiario de servicios ecosistémicos que van desde el agua para la preparación de sus alimentos hasta el goce espiritual de lugares ancestrales o sagrados.

Por todos estos aspectos, la EMA reconoce la necesidad fundamental de incluir al habitante de la alta montaña dentro de la construcción de la estrategia de monitoreo integrado y para ello hace uso de las herramientas del monitoreo comunitario participativo, que en el contexto de este protocolo puede definirse como un instrumento de participación social impulsado por actores locales o externos a través del cual las comunidades conocen la situación de sus territorios y observan los cambios que se presentan por una acción determinada. Esto les permite hacer seguimiento a sus ecosistemas, recursos naturales y servicios ecosistémicos, lo que contribuye a la toma de acciones informadas de manejo y adaptación, y a la construcción de sus planes de vida y etno-desarrollo (Herrera, 2020; Yepes et al., 2018).

Además de contribuir a la aplicación integral del modelo conceptual de la EMA, el monitoreo comunitario participativo presenta ventajas asociadas al hecho de que quienes desarrollan las actividades, conocen el lugar y se benefician de él (Armero & Galvis, 2021; Herrera, 2020; MADS, 2018).

Entre las ventajas del monitoreo comunitario y participativo están:

- Conservación de la biodiversidad y manejo de la deforestación, debido a que las comunidades al conocer el estado de sus recursos pueden hacer un mejor aprovechamiento de los mismos.
- Mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad.

- Desarrollo de capacidades que incentiven el empoderamiento y gobernanza en las comunidades locales.
- Suministro de información para la toma de decisiones a nivel local.
- Facilitación de la gestión adaptativa y datos para los sistemas de monitoreo nacionales e internacionales
- Mantenimiento de acciones de intervención en tiempos que van más allá de los ciclos administrativos o institucionales.
- Fortalecimiento de la conservación y la protección de los conocimientos ancestrales y tradicionales
- Recuperación de sitios sagrados o de valor espiritual.

El primer avance de la EMA para la integración de las comunidades corresponde al desarrollo del Protocolo de Monitoreo Integrado y Participativo de la Alta Montaña PMIP-AM (IDEAM, 2022b) elaborado por un equipo interinstitucional de expertos en las distintas áreas de monitoreo de la EMA, y donde se estableció un proceso de interlocución con pueblos indígenas, comunidades afrocolombianas y campesinas, para la construcción, socialización y validación del protocolo. La Tabla 13 de la sección 7.1.1 presenta las fuentes de información para la localización de áreas de resguardo indígena, reservas campesinas y territorios colectivos de comunidades negras.

El PMIP-AM presenta lineamientos para la participación comunitaria, un procedimiento para la implementación de procesos de monitoreo participativo y comunitario, y procedimientos posibles para tomar datos en cada área temática de la EMA a partir de preguntas, variables, índices e indicadores. Todos estos pueden ser enriquecidos y priorizados según el criterio y los intereses de los espacios locales en cada contexto de implementación.

De acuerdo al documento citado, los procesos de monitoreo participativo están orientados a conocer el estado del territorio por parte de las comunidades, y con el tiempo a establecer sus principales dinámicas. A la postre esta información ayuda a orientar acciones de manejo, adaptación, gestión, etc., mediante acuerdos entre los actores, que luego podrían ser incluidos dentro del programa de monitoreo. Para lograrlo, el procedimiento de implementación propuesto, plantea 5 fases.

Fase 1 – Aprestamiento institucional

En esta fase se busca cubrir una serie de condiciones habilitantes para el monitoreo, como la capacitación de los funcionarios encargados de la actividad, y el mapeo de los actores locales y conflictos. Aunque no es explícito en el PMIP-AM, en el aprestamiento también debe definirse las fuentes de los recursos y realizarse un primer acercamiento a los actores para determinar su interés y disposición a participar en la actividad. De manera complementaria a lo establecido en el protocolo, se pueden identificar y vincular ONG's y entidades académicas capacitadas y con experiencia para dar apoyo al monitoreo participativo, reduciendo la carga de los funcionarios institucionales.

Actores estratégicos y procesos clave a identificar en esta fase corresponden a aquellos asociados con figuras de protección, zonificación o manejo especial como parques nacionales, complejos de páramos, reservas campesinas, resguardos indígenas o territorios colectivos de comunidades negras o afrocolombianas, y aquellos que desarrollen actividades de monitoreo para programas nacionales o regionales, que puedan conectarse con el monitoreo local.

Fase 2 – Diagnóstico deliberativo

Disponiendo de los recursos, y establecida la voluntad de los actores locales, en esta fase se inicia el proceso de construcción de la estrategia de monitoreo con la comunidad, a través de la promoción de espacios donde se identifiquen las problemáticas, los intereses, las preguntas, los posibles objetivos, fortalezas y debilidades. Con este panorama en mente se pueden orientar los acuerdos con respecto a los sitios y variables que se van a monitorear, así como sobre los procedimientos que se van a utilizar. Este conjunto de acciones configura un plan básico de monitoreo.

En la práctica este no es un proceso lineal, pues dependerá de las capacidades institucionales y locales para implementar la estrategia, que pueden robustecerse en el tiempo, por ejemplo, a través de la obtención de recursos, cuyo acceso se facilita en la medida en que aumenta la organización y las posibilidades de gestión local.

Fase 3 – Implementación del monitoreo:

En esta fase se ejecuta el plan de monitoreo, empezando con el fortalecimiento de capacidades de los actores locales, y pasando por la implementación de los procedimientos de muestreo, el análisis de la información, la discusión de resultados, el uso para la toma de decisiones, y la comunicación de los resultados.

Fases 4 y 5 – Análisis comparativo de resultados y retroalimentación del proceso:

Estas fases desbordan el ámbito local, y permiten a la EMA, la comparación entre resultados de diferentes ventanas de observación, y la evaluación del proceso general de monitoreo participativo en la escala nacional para construir un plan de mejoramiento.

Detalles adicionales del procedimiento puede consultarse directamente en el PMIP-AM. Algunos aspectos relevantes para el monitoreo comunitario participativo que se mencionan, pero no se alcanzan a desarrollar en el documento, corresponden al enfoque diferencial, a la profundización de actividades de las fases 1, 2 y 3, y a la integración con fuentes de financiación. Algunos documentos complementarios y directrices se presentan en la Tabla 17, de la sección 7.3.1 y se ponen a consideración para el mejoramiento del PMIP-AM.

6.4. CONEXIONES CON OTRAS ESCALAS

6.4.1. Conexiones y aportes a la escala internacional

A escala transandina, la mayor oportunidad de conexión se presenta con la iniciativa iMHEA que hace presencia en Colombia (sección 3.7.1), y que puede anidarse a la EMA-LHC. Los requisitos principales incluyen, el tamaño de las microcuencas (entre 0.2 y 10 km² ó 1000 ha) y su homogeneidad, ya que debe dominar un solo tipo de uso o cobertura, con no menos del 75% del área total. La iniciativa puede ser articulada con procesos de monitoreo participativo, ya que propone un enfoque simplificado de monitoreo mínimo con dos variables (sección 3.7.1) que facilita la implementación por comunidades locales. Otras oportunidades de integración se dan en microcuencas con coberturas homogéneas donde exista monitoreo de caudales o en zonas no monitoreadas donde se quieran investigar la oferta y la regulación hídrica de una cobertura particular.

La recomendación para cada paisaje hidrográfico donde se implemente la EMA-LHC, es la evaluación de la existencia de microcuencas que cumplan con las características de tamaño y homogeneidad requeridas por la iMHEA, y la implementación de la iniciativa si la microcuenca ya tiene monitoreo de caudales, si el monitoreo

de la microcuenca coincide con los intereses comunitarios, o si el monitoreo de la microcuenca es relevante desde punto de vista investigativo o informativo para los promotores del monitoreo.

Mayores detalles para esta estrategia pueden consultarse en la referencia (Céleri et al., 2012) y en la página web www.imhea.org

Como iniciativa potencial para la conexión con la escala transandina también se debe tener en cuenta la Red GLORIA Andes, que, si bien no es específicamente para variables hidroclimáticas como en el caso anterior, si puede ser complementada con este tipo de monitoreo.

6.4.2. Conexiones y aportes a la escala nacional

Para la escala nacional la principal contribución de la EMA-LHC es ofrecer una serie de lineamientos que pueden ser considerados en la selección de ventanas de observación, para la implementación de una estrategia de monitoreo hidroclimático en los paisajes que ya cuenten con alguna iniciativa de monitoreo.

De acuerdo a la EMA, la identificación y priorización de los paisajes a monitorear debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- i. Gradientes ambientales de variación a escala nacional en términos geológicos, topográficos y edáficos
- ii. La presencia de diversos esquemas de gobernanza y ordenación del territorio
- iii. La extensión de los procesos de cambio generados por actividades agropecuarias, mineras, etc.
- iv. La exposición/vulnerabilidad a la variación y el cambio climático

Por su parte el PMIP-AM propone los siguientes criterios puntuales para la selección de ventanas de observación a escala de paisaje:

- a) Maximizar la variedad de condiciones ambientales (humedad, temperatura, precipitación, interceptación, coberturas, etc.)
- b) Maximizar la variedad de contextos socioculturales (tipo de ocupación del territorio, habitantes por área, tipo de conflictos socioambientales).
- c) Amplitud geográfica (distribuir, geográficamente, las ventanas de monitoreo sobre las cuatro áreas definidas para el Reporte de Estado y Tendencia de la Alta Montaña, RETAM).
- d) Condiciones logísticas (considerar la facilidad para la implementación del monitoreo, de acuerdo con las condiciones logísticas disponibles: distancia a centros poblados, vías, facilidades de acomodamiento, alimentación, etc.).
- e) Oportunidades de financiación.

Con respecto al literal c) la EMA-LHC distingue en ocasiones el sector del Nudo de los Pastos por sus características bioclimáticas diferenciales (Morales et al., 2007).

Los aspectos fijados en la EMA, los criterios *a*, *b* y *c* del PMIP-AM, los análisis preliminares de información realizados en el estado del arte de este protocolo, y la relación del área hidrográfica con sistemas de abastecimiento, llevaron a la formulación de una serie de características diferenciales para potenciales ventanas de observación que se resumen en la Tabla 11.

| Aspectos/criterios para selección de ventanas | Características diferenciales de la ventana de observación o paisaje hidrográfico (PH) |
|---|--|
| Abastecimiento | PH con microcuencas abastecedoras de i) sistemas de acueducto, ii) sistemas de riego o iii) sistemas de generación eléctrica (PCH's, aferentes a embalses, etc.) |
| Figuras de protección | PH i) sin presencia de figuras de protección, ii) en áreas de parques naturales, iii) en complejo de páramo reglamentado |
| Esquema de gobernanza | PH en área i) sin procesos de gobernanza, ii) con resguardos indígenas o con presencia de comunidades indígenas, iii) zonas de reserva campesina o con presencia de comunidades campesinas organizadas iv) en territorios colectivos de comunidades negras o afro, o presencia de comunidades afro organizadas |
| Exposición/Vulnerabilidad | PH en área con alto grado de exposición o vulnerabilidad a la variabilidad climática o al cambio climático. |
| Extensión de transformación antrópica | PH i) poco intervenidas, ii) densamente pobladas, iii) altamente transformadas por cultivos, iv) por ganadería o v) por minería |
| Amplitud geográfica | PH perteneciente al sector de i) la Sierra Nevada, ii) la Cordillera Central, iii) la Cordillera Occidental, iv) de la Cordillera Oriental o v) del Nudo de los Pastos |
| Condiciones ambientales | PH de i) vertiente de baja precipitación, ii) de vertiente de alta precipitación, iii) entre muy húmeda y pluvial, iv) entre seca y semihúmeda, v) con alta incidencia de precipitación horizontal, vi) con alta incidencia de lagos, humedales y turberas y vii) con presencia de glaciares |
| Condiciones edáficas | PH con alta incidencia de suelos: i) andosoles, ii) entisoles, iii) inceptisoles, iv) histosoles y v) vertisoles, vi) suelos agrícolas, vii) suelos pecuarios |
| Condiciones geológicas | PH con i) subsuelo impermeable, y ii) con flujos subterráneos |
| Unidades homogéneas de vegetación, coberturas de la tierra, conglomerados, zonas de vida de holdridge, etc. | PH con unidades ecohidrológicas bien diferenciadas. |

Tabla 11. Características diferenciales en paisajes de alta montaña relevantes para la selección de ventanas de monitoreo
Elaboración: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

Dependiendo de los intereses de los promotores de la iniciativa de monitoreo se podrá priorizar cualquiera de los aspectos o criterios de la Tabla 11. Sin embargo, siguiendo los criterios *a*, *b* y *c* del PMIP-AM se recomienda para los ejercicios iniciales de la EMA, evitar la selección de ventanas con condiciones repetitivas o similares a las de otras ventanas, ya que como se ve observó, existe una importante diversidad de escenarios por explorar; aunque es claro que algunos de ellos pueden ir asociados, como en caso de suelos de tipo histosol y áreas con alta incidencia de humedales.

La situación real es que una misma ventana agrupe varias características diferenciales. El ejercicio piloto de la EMA en el paisaje hidrográfico de Rio Claro, incluyó presencia de glaciar, presencia incipiente de procesos de gobernanza comunitaria local, áreas altamente transformadas por ganadería, figuras de protección como el PNN los Nevados y el Complejo de Páramos los Nevados, entre las más representativas. Con este antecedente, para lograr un alto contraste en un futuro proceso de monitoreo de la EMA, pueden seleccionarse un paisaje hidrográfico con procesos de organización comunitaria, ubicado en un sector diferente a la Cordillera Central, sin presencia de glaciares, de baja transformación, o con prácticas o proyectos de manejo sostenible.

La diversidad dentro de un mismo paisaje, le otorga mayor relevancia la aplicación del monitoreo propuesto por la iMHEA, para capturar y comparar las dinámicas hidrológicas particulares asociadas a microcuencas con características diferenciales dentro de un paisaje hidrográfico. Así la iMHEA se considera como una estrategia de monitoreo para anidar dentro de la EMA-LHC.

6.4.3. Conexiones con la escala de complejos de páramos

A nivel nacional el aliado con mayor potencial para el monitoreo hidroclimático de la EMA a escala de paisajes corresponde a las comisiones conjuntas de corporaciones autónomas regionales que desarrollan los planes de manejo de los complejos de páramos. Existen dos puntos de conexión claves, el primero con el monitoreo comunitario participativo y el segundo para el desarrollo de un modelo hidrológico para el complejo.

En la componente participativa las conexiones específicas pueden darse en los siguientes puntos cuyos objetivos asociados se presentan en la sección 6.5.2.

- Programas de educación ambiental, donde se incluya el monitoreo de variables hidroclimáticas
- Monitoreo de variables hidroclimáticas en sistemas de abastecimiento veredales o comunitarios
- Monitoreo de variables hidroclimáticas en zonas priorizadas para la restauración o para la implementación de estrategias de manejo productivo, que fomenten esquemas de pago por servicios ambientales.

En cuanto a la modelación hidrológica, la idea es que la modelación a escala de paisajes hidrográficos de la EMA, se convierta en el promotor o punto de partida para la implementación de modelos hidrológicos distribuidos a escala de complejos, que sigan los lineamientos por el Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Páramos (PMHP) (García, 2018), diseñado para la escala de complejos. De esta manera los modelos hidrológicos realizados a escala de paisajes siguiendo los lineamientos de la EMA-LHC aportarían información para los gradientes ambientales del complejo, (ej, precipitación horizontal, aguas subterráneas, suelos, vegetación, zonas nivales), guiarían su implementación y permitirían la validación y calibración del modelo del complejo, como se establece en las directrices del PMHP.

6.4.4. Conexiones con la escala de parcelas

En este caso la herramienta clave es la del monitoreo ecohidrológico, para mediciones de balance hídrico a escala de parcelas donde pueden analizarse variables del ciclo hidrológico asociadas a los factores climáticos o atmosféricos, a las coberturas vegetales, y a los suelos. Estas iniciativas pueden aprovechar la presencia y el interés de las comunidades locales para su desarrollo bien sea desde el monitoreo participativo o el contributivo (Herrera, 2020). Algunas de las variables hidrológicas para medir son: niebla, escorrentía superficial, evapotranspiración e infiltración en el suelo (Cusgüen et al., 2021).

6.5. OBJETIVOS PARA LA ESCALA DE PAISAJES

A escala de paisaje, el marco estratégico de la EMA-LHC presenta un compendio de los principales objetivos y un orden lógico de alcance, que se conecta con los lineamientos generales, intereses de los promotores de monitoreo y con las características diferenciales de los paisajes hidroclimáticos definidas en secciones anteriores (Tabla 11). Algunos de estos objetivos presentan de manera implícita las conexiones con otras áreas de monitoreo como la de suelos, carbono y de biodiversidad, y en particular con la escala de ecosistemas/parcelas, de donde se obtiene la información que conecta estas áreas de estudio con el monitoreo hidroclimático.

Una manera de presentar los intereses de los promotores en una forma útil para la relacionarlos con los objetivos de monitoreo hidrológico plantea las siguientes tres situaciones. En la primera se agrupan los intereses de tipo técnico/investigativo, orientados a mejorar el conocimiento de las distintas áreas temáticas para una región de estudio. En la segunda se tienen intereses asociados al fortalecimiento de la gobernanza en los territorios, y finalmente se tienen intereses en la implementación de proceso de conservación, restauración o reconversión, que a su vez contribuyen al fortalecimiento de la gobernanza (Yepes et al., 2018). Aunque un promotor no tenga directamente intereses de carácter técnico/investigativo, puede lograrse una conexión con el monitoreo hidrológico participativo, bien sea porque el programa de monitoreo contribuya al fortalecimiento de procesos de gobernanza, o porque complementa el seguimiento a los procesos de conservación, restauración o reconversión desarrollados por la comunidad, mostrando su impacto en los servicios ecosistémicos de oferta y regulación hídrica.

La premisa de la EMA-LHC, es que no se empieza de cero. En sus fundamentos, la estrategia pretende la integración de diferentes iniciativas de monitoreo por lo que siempre se contará al menos con una iniciativa de referencia para empezar. Teniendo en cuenta lo anterior, este protocolo asume algunas condiciones iniciales para su implementación que en el nivel más básico se clasifican en paisajes hidrográficos con o sin iniciativas de monitoreo hidroclimático. Dentro de cada grupo se plantean escenarios más detallados a partir de los cuales pueden definirse los objetivos de monitoreo inmediatos, más cercanos y subsecuentes que orienten el diseño de un programa de monitoreo, teniendo en cuenta la información disponible de variables de monitoreo y los intereses de los actores potenciales. En todos los casos se asume, disponibilidad de información de coberturas o posibilidad para su estimación a través de imágenes satelitales.

El propósito de estos lineamientos y condiciones iniciales es brindar una orientación sencilla, clara y lógica para desarrollar estrategias de monitoreo hidroclimático orientadas por objetivos, que se adapten a la mayor cantidad de escenarios de monitoreo que pueden encontrarse a escala de paisaje para el desarrollo de la EMA.

6.5.1. Condición inicial 1: Paisajes hidrográficos con iniciativas de monitoreo hidroclimático

Dentro de esta condición inicial, los escenarios específicos se definen con respecto a las variables monitoreadas y a la temporalidad de las series. Para todos los casos puede asumirse la disponibilidad del modelo de elevación digital del terreno para el cálculo de parámetros de interés hidrológico, y disponibilidad de datos de temperaturas, ya que, ante la ausencia de estaciones, puede recurrirse a datos de sensores remotos que para la temperatura ofrecen un grado de confiabilidad aceptable, lo que no sucede con otras variables que presentan alta variabilidad espacial (secciones 3.5.1 y 3.5.2).

Condición Inicial CI 1.1 Monitoreo de precipitación

Este es el escenario más básico, y corresponde a un área de estudio donde solo se tienen series de precipitación.

Objetivos orientados a la caracterización hidroclimática (O_CHC): Los objetivos inmediatos corresponden a la caracterización hidroclimática que puede incluir el análisis de series y su procesamiento para generación de indicadores. El PMIP-AM sugiere hietogramas para eventos de tormenta, series agregadas para caracterización del régimen de precipitación, cálculo del índice estandarizado de precipitación (SPI por sus siglas en inglés) para identificar sequías meteorológicas u otro tipo de eventos. También se pueden incluir las características fisiográficas de la cuenca, para el estudio de sus características hidrológicas. Para el caso de estaciones en franjas de paramo bajo a superpáramo, puede hacerse una clasificación en términos de

pluviosidad de acuerdo a la Tabla 3 de la sección 3.5.2. Para la escala de paisajes es importante la caracterización hidroclimática en función del gradiente altitudinal en caso de disponibilidad de información. Si se cuenta con varias estaciones de precipitación puede especializarse la caracterización climática y elaborar mapas de isoyetas para el área de estudio.

El objetivo más cercano para este escenario corresponde a complementar el monitoreo de precipitación con monitoreo de caudales, y si se cumplen las condiciones, y existen intereses de la comunidad, o de los promotores del monitoreo, implementar el modelo iMHEA. Los objetivos subsecuentes a alcanzar en este escenario corresponden a los objetivos más cercanos mostrados en CI 1.3, y de los casos CI 2.2 en escenarios de participación comunitaria.

Condición Inicial CI 1.2 Monitoreo de niveles/caudales

No es común que solo se cuente con monitoreo de caudales sin tener alguna estación de precipitación cercana, pero dada la situación aún pueden alcanzarse algunos objetivos que dependerán de la longitud de las series y de la disponibilidad de información de disturbios o dinámica de factores de cambio.

Los objetivos inmediatos corresponden a caracterización hidroclimática (O_CHC). El PMIP-AM sugiere hidrogramas para identificación de crecientes, agregación temporal a diferentes escalas para obtener mínimos, máximos y medios, cálculo de curva de duración de caudales, cálculo de índice de regulación hídrica, análisis de caudal base y rendimientos hídrico.

Objetivos orientados a la conexión directa con impactos de cambio en coberturas (O_ICob): En conexión con factores de cambio, como disturbios naturales o antrópicos, procesos de restauración, reconversión, o paramización, las series pueden ser analizadas para identificar los impactos de dichos factores, si se dispone de información y aplican para la microcuenca o área hidrográfica monitoreada. Es de especial interés para diferentes tipos de sistemas de abastecimiento comunitarios o de mayor tamaño, bien sea de agua para consumo humano, para generación eléctrica, para riego u otros usos productivos.

Objetivos orientados a la conexión directa con impacto climático (O_ICli): En condiciones relativamente estables (descartando disturbios naturales o antrópicos, y paramización), las series pueden utilizarse para analizar impactos de variabilidad climática incluidos fenómenos ENSO, y el en caso de series del orden de décadas, para analizar impactos por cambio climático.

Objetivos orientados a monitoreo tipo iMHEA (O_iMHEA): el objetivo más cercano para este escenario corresponde a complementar con monitoreo de precipitación. y si se cumplen las condiciones, y existen intereses de la comunidad, o de los promotores del monitoreo, implementar el modelo iMHEA.

Los objetivos subsecuentes luego de que se llega a monitoreo tipo iMHEA, serán el de análisis de componentes del balance hídrico y de implementación de modelos hidrológicos que se muestran a continuación.

Condición Inicial CI 1.3 Monitoreo de precipitación y niveles o caudales

Este escenario de partida permite poner en consideración todos los objetivos planteados en los escenarios previos, teniendo en cuenta sus respectivos condicionantes.

La premisa de este escenario es que la localización relativa de las estaciones permite relacionarlas, es decir, que no es una situación como una estación de caudales a la salida de un glaciar y una estación de

precipitación en un bosque altoandino, que correspondería simplemente a tener simultáneamente una condición CI 1.1 y otra CI 1.2.

Se plantean dos casos, uno que permite la implementación de modelación hidrológica y otro que presenta limitantes, siendo las principales el horizonte de tiempo y la calidad de las series.

Condición Inicial CI 1.3.1 Con limitantes para modelación hidrológica

Objetivos orientados al balance hídrico y la modelación hidrológica (O_BMH): Bajo este escenario pueden realizarse algunos análisis con balances hídricos simplificados que dan nociones sobre el comportamiento de flujos de salida, almacenamientos, y variables como la escorrentía.

Objetivos orientados a la recuperación de estaciones de monitoreo (O_REM): Los objetivos más cercanos en esta situación corresponden a posibilitar el desarrollo de modelos hidrológico y/o la adopción de modelo IMHEA. Lo anterior puede implicar la recuperación o ajustes de las estaciones de monitoreo para asegurar la continuidad y calidad de la información o la adición de estaciones para medición de precipitación.

Una vez se logre alguna de las dos, los objetivos subsecuentes corresponden a los alcanzables a través de la iniciativa IMHEA o a los alcanzables con monitoreo hidrológico.

Condición Inicial CI 1.3.2 Monitoreo con posibilidades de modelación hidrológica distribuida

La posibilidad de incorporar información espacializada de coberturas, suelos y variables climáticas, hace de la modelación hidrológica distribuida una necesidad para la EMA. En el país varios centros de educación superior, vienen trabajando herramientas de este tipo (sección 3.8), y se espera integrar su experiencia y conocimiento para el avance de la EMA.

Modelación hidrológica de impacto de cambios en coberturas (O_MHICob): El objetivo inmediato a lograr mediante modelación hidrológica distribuida, corresponde a la modelación de impactos sobre la oferta hídrica por cambios en usos y coberturas del suelo. Este es un objetivo fundamental para la EMA, que implica un grado importante de complejidad pues relaciona múltiples disciplinas y fuentes de información, pero el esfuerzo vale la pena porque se logra la conexión entre uno de los principales servicios ecosistémicos y uno de los principales factores de cambio, que a su vez pueden contribuir al mejoramiento de los incentivos de mecanismos de pago por servicios ambientales (PSA) (sección 4).

Modelación hidrológica de impactos climáticos (O_MHicli): En segunda instancia, la modelación hidrológica puede utilizarse para representar cambios en la oferta hídrica derivados de factores climáticos, pero se consideran de menor impacto con relación a los derivados de cambios antrópicos en usos y coberturas (Cusgüen et al., 2021). En este tipo de objetivos también es importante contar con series de datos que cubran períodos de tiempo del orden de décadas.

Modelación hidrológica de escenarios de riesgo (O_MHRi): Otro aspecto que puede abordarse con modelación hidrológica es el de análisis de riesgos asociados a eventos extremos. Para el caso de la alta montaña, las inundaciones por aumento de los cauces no son comunes y las avenidas torrenciales con gran potencial de afectación no suelen esperarse por los tamaños y características de las cuencas, y por la buena regulación hídrica de sus ecosistemas. Sin embargo, el tema toma relevancia en el caso de glaciares, lo que implica la necesidad de información complementaria para refinar el balance hidrológico.

Objetivos asociados al refinamiento de los modelos hidrológicos y a la profundización del conocimiento de los componentes del balance hidrológico (O_RefBH): Para entender mejor la dinámica de oferta y la regulación hídrica de la alta montaña, y el efecto que en ella tienen los principales factores de cambio, es necesario investigar con mayor profundidad diferentes componentes y procesos del balance hidrológico, principalmente en aquellos casos donde la investigación es aún incipiente (sección 3.5). A su vez, esta información permitirá un mejor ajuste de los modelos hidrológicos, que redunde en resultados más confiables para los tomadores de decisiones e inversores en programas de restauración y conservación de ecosistemas de alta montaña.

Existen varias alternativas en este punto, y para tomar la decisión sobre el objetivo a seguir deberán considerarse un conjunto importante de aspectos como los intereses de los promotores de los programas de monitoreo, los actores locales, los aliados potenciales, las especificidades de las áreas de estudio, y las relaciones costo/beneficio de las alternativas encontradas. Sin embargo, la dificultad en el logro de objetivos asociados en este escenario estará mediada por la disponibilidad de la información y la existencia o no de iniciativas de monitoreo. Cuando la información ya existe los desafíos son técnicos/informáticos para la inclusión de datos dentro de los modelos hidrológicos, y de gestión para acceder a la información. Cuando la información apenas se va a recopilar, se tienen desafíos de monitoreo que van desde la planificación, pasando por los recursos humanos y la infraestructura, hasta la transmisión y recolección de datos. A continuación, se presenta un panorama sintético de estos objetivos en orden progresivo de dificultad.

Objetivos alcanzables con información de monitoreo de otras variables disponibles y de libre acceso (O_RefBH1): El caso modelo es el de monitoreo de glaciares. Esta información puede incorporarse a los modelos hidrológicos contribuyendo a una estimación más consistente con la realidad de las entradas al balance hidrológico. Este objetivo puede alcanzarse con relativa facilidad, ya que la información de monitoreo de glaciares del IDEAM es abierta y puede consultarse y solicitarse a través de sus canales institucionales. Desde el punto de las especificidades regionales, solo atañe al sector de la Sierra Nevada y algunos complejos de páramos ubicados en la cordillera central. Como aliados potenciales se tienen instituciones académicas que han trabajado en modelación hidrológica de glaciares como la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Otros escenarios involucran instituciones del orden nacional como el IGAC y el Instituto Humboldt, y del orden regional como las CARs, quienes pueden aportar datos geológicos, hidrogeológicos, de coberturas y suelos. En este aspecto se espera que la EMA avance hacia la consolidación de una base de datos nacional que esté disponible para las iniciativas a escala de paisaje.

Además de la dinámica glaciar, pueden incorporarse otras variables de monitoreo como humedad relativa, brillo solar, evapotranspiración, velocidad y dirección de los vientos, entre otros. La limitante en este caso vendrá de las posibilidades que ofrezcan los modelos para su incorporación.

Objetivos alcanzables con información de monitoreo de otras variables existentes, pero de acceso restringido (O_RefBH2): Se trata de escenarios donde se tiene información asociada al balance hidrológico pero que pertenece a otras organizaciones, como universidades, o centros de investigación. En este caso la alternativa pasa por la construcción de acuerdos de cooperación para uso compartido de la información, vinculación de instituciones a la EMA, y si es opcional, la compra de datos.

Objetivos alcanzables a través de iniciativas de monitoreo en curso que se puedan asociar al monitoreo hidrológico (O_RefBH3): Programas de monitoreo como el de carbono, guardan una estrecha relación con la componente hidrológica. Esta situación puede aprovecharse para incorporar el monitoreo de variables

asociadas a la capacidad de retención de agua de los suelos, que permiten refinar el balance hidrológico, y mejorar el ajuste de los modelos. La ventaja es que pueden aprovecharse los recursos de la iniciativa de monitoreo en curso. Es este caso puede establecerse la conexión de la escala de paisajes con la de ecosistemas y parcelas, a partir de los estudios complementarios de variables de tipo hidrológico en las parcelas de las iniciativas de monitoreo en curso.

Objetivos que requieren el monitoreo de variables desde cero (O_RefBH4): Las particularidades de una zona de estudio pueden exigir el monitoreo de variables del ciclo hidrológico no medidas comúnmente como la precipitación horizontal, o los flujos subterráneos. Si no existen programas de monitoreo que puedan dar soporte a estas nuevas iniciativas, nos encontraremos ante los objetivos que demandan un mayor esfuerzo por que implican la planificación, los recursos financieros, los recursos humanos, la instrumentación, la administración, la transmisión, la recolección de los datos y su análisis.

Objetivos para tomadores de decisiones y promotores de esquemas de pago por servicios ambientales y negocios verdes (O_TD): Tanto el refinamiento de la modelación hidrológica en alta montaña, como el monitoreo hídrico en programas de reforestación y reconversión productiva, aportarán información para estimar los impactos en la oferta y regulación hídrica, que a la postre pueden servir como insumos para tomadores de decisiones y para promotores de proyectos financiables por esquemas de pago por servicios ambientales y negocios verdes. En estos casos, además del costo de oportunidad, se puede empezar a considerar los impactos económicos positivos de la regulación hídrica y la consecuente estabilización y disponibilidad de la oferta hídrica, para ofrecer mejores incentivos a la conservación, reconversión y restauración.

Consideraciones adicionales para el monitoreo con posibilidades de modelación hidrológica distribuida

Dependiendo de las características diferenciales de un paisaje, se tendrá diferente incidencia de los elementos del balance hídrico. Las más evidentes son la importancia de los flujos subterráneos en paisajes con presencia de acuíferos, y la contribución de la precipitación horizontal al flujo de entrada del balance hídrico, en regiones muy húmedas. La Tabla 12 presenta una síntesis de la relevancia de la investigación de distintos procesos, o variables del ciclo hidrológico dentro de balance hídrico, basado en la magnitud de los flujos reportados en estudios hidrológicos para alta montaña (Cusgüen et al., 2021; R. Hofstede et al., 2014; MAVDT & Instituto Humboldt, 2010), y al criterio de expertos.

Considerando únicamente la importancia relativa de los flujos de cada proceso dentro del balance hídrico, el monitoreo debería abordarse priorizando aquellos de mayor impacto, de acuerdo a las características diferenciales del paisaje de estudio.

6.5.2. Condición inicial 2: Paisajes hidrográficos sin iniciativas de monitoreo hidroclimático

En esta situación se consideran dos escenarios básicos, iniciativas de monitoreo institucional, o iniciativas de monitoreo comunitario participativo.

Condición Inicial CI 2.1 Áreas con Iniciativas de monitoreo institucional

Se trata de escenarios donde se tienen iniciativas de monitoreo institucional que puedan guardar alguna relación con el monitoreo hidrológico, como las de bosques, carbono, y biodiversidad (sección 3.7.5). El objetivo inmediato es complementar dichas iniciativas para que ofrezcan mejor información para los balances hidrológicos (O_RefBH3), como las propiedades hídricas de los suelos, la capacidad de intercepción de la

vegetación, la evapotranspiración, y los almacenamiento y flujos de agua en parcelas. Es análogo al caso CI 1.3.2 donde se tienen iniciativas de monitoreo existentes a nivel de parcelas o ecosistemas.

| Tipo de flujo | Importancia relativa del flujo dentro del balance hidrológico | Características diferenciales donde la incidencia es mayor |
|---------------------------------------|---|---|
| Fusión | Baja | Glaciares |
| Lluvia | Alta | Generalizada |
| Precipitación horizontal/intercepción | Baja-Media | Baja en zonas secas, y alta en zonas húmedas a pluviales con coberturas naturales en mosaicos |
| Evaporación | Baja-Media | Baja en zonas húmedas con incidencia de neblina, alta humedad relativa. Significativa en páramos secos |
| Transpiración | Baja-Media | Baja en áreas de coberturas naturales. Puede hacerse significativa en algunos cultivos o plantaciones |
| Escorrentía en tronco | Muy baja | Zonas con coberturas vegetales densas |
| Consumo vegetación | Baja-Media | Baja en áreas de coberturas naturales. Puede hacerse significativa en algunos cultivos o plantaciones |
| Escorrentía superficial | Medio-Alta | Media en suelos no degradados, y alta en suelos compactados, suelos agrícolas y pecuarios |
| Infiltración | Media-Alta | Media en suelos compactados, suelos agrícolas y pecuarios, alta en suelos no intervenidos, suelos andosoles |
| Flujos subterráneos | Media-Alta | Áreas con incidencia de acuíferos |

Tabla 12. Importancia relativa de flujos dentro del balance hidrológico

Fuente: Autores y referencias seleccionadas (Cusgüen et al., 2021; R. Hofstede et al., 2014; MAVDT & Instituto Humboldt, 2010)

Como objetivos cercanos se puede proponer la medición de caudales a nivel de la microcuenca donde se tienen las parcelas de monitoreo (O_ICob), y analizar las relaciones entre las variables medidas. Si las condiciones son las adecuadas también se puede llegar a monitoreo tipo IMHEA o a mayor plazo, a objetivos de modelación hidrológica.

Condición Inicial CI 2.2 Áreas con monitoreo participativo

El monitoreo hidrológico puede trabajarse con las comunidades desde diferentes perspectivas y momentos, buscando diferentes objetivos como se propone a continuación

Monitoreo de estado o diagnóstico: Se trata del momento inicial del monitoreo comunitario participativo, en el que puede incluirse el monitoreo de caudales en cauces de interés, como parte del panorama general que desea tener la comunidad de su entorno. En este punto, el monitoreo puede ser de baja frecuencia, y limitarse a medidas en períodos secos y húmedos.

Monitoreo de variables climáticas: Las variables climáticas como precipitación, temperatura, brillo solar y humedad, son de interés para las comunidades locales, y su instrumentación es relativamente simple. Además, puede contribuir a la generación de sistemas de alertas tempranas y de programas de educación ambiental, como los planteados en los planes de manejo de algunos complejos de páramos (sección 6.4.3).

Monitoreo de dinámicas locales de oferta y regulación hídrica: En el caso que las comunidades desarrollen procesos de largo alcance cuyas dinámicas deseen conocer, como iniciativas de restauración y reconversión, o cuando se tengan identificadas problemáticas en sus sistemas de abastecimiento, se recomienda el monitoreo de caudales de frecuencia mayor a la diaria (O_ICob). Las iniciativas pueden desarrollarse hasta monitoreo tipo iMHEA sin que resulte prohibitivo para las capacidades locales.

Monitoreo contributivo y colaborativo: Aunque durante la fase de diagnóstico deliberativo las comunidades podrían no incluir dentro de sus prioridades el monitoreo de algunas variables importantes para la modelación hidrológica, podría lograrse su vinculación a iniciativas de monitoreo que permitan un mejor entendimiento del balance hidrológico, realizando actividades en parcelas de monitoreo (O_RefBH2, 3 y 4), analizando algunos datos, y compartiéndolos con las comunidades desde estrategias de difusión locales.

La Figura 18 sintetiza los principales aspectos estratégicos de la EMA-LHC para el caso de que exista algún tipo de monitoreo institucional o comunitario, presentando la conectividad de los objetivos propuestos en función de la información disponible, y destacando la posible interrelación con las comunidades. La lectura de la Figura 18 en el marco de lo presentado previamente en este documento indica, por ejemplo, que cuando se cuenta con series de precipitación y caudales que cumplen con ciertos estándares de calidad (condición inicial 1.3.2), pueden alcanzarse objetivos de modelación hidrológica y todos los objetivos previos como generación de indicadores para caracterización hidrológica. Además, en caso que las áreas cuenten con coberturas homogéneas, pueden implementarse iniciativas tipo iMHEA. En relación con las comunidades (columna de la derecha), estas pueden vincularse a través del monitoreo tanto de impactos de actividades antrópicas (deforestación, reforestación, cambios de uso, etc.) como de variables básicas del balance hidrológico (temperatura, precipitación y caudales).

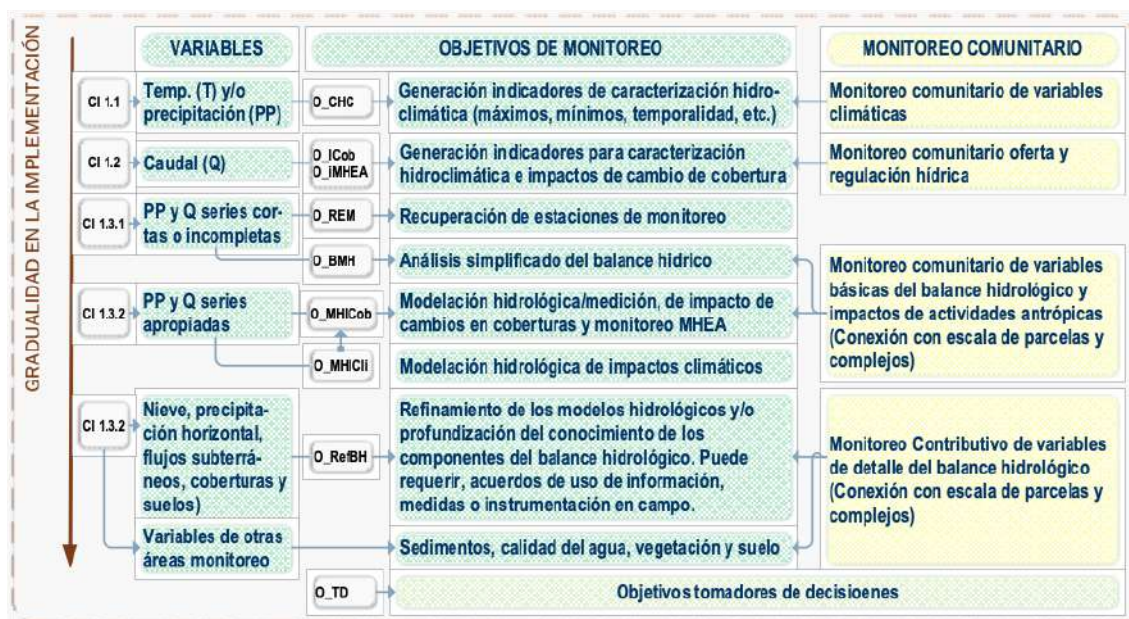


Figura 18. Síntesis de la estrategia para la construcción de objetivos en la EMA-LHC

Elaboración: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

7. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO HIDROCLIMÁTICO A ESCALA DE PAISAJE

La presentación detallada de lineamientos generales (sección 6.2), condiciones iniciales y objetivos de monitoreo de la sección 6.5, tiene como propósito fundamental orientar el diseño del sistema de monitoreo a escala de paisaje. Para esto se propone la recolección de una serie de información que atañe al monitoreo hidroclimático, con la que se logre establecer la condición inicial del área de estudio y las variables disponibles, para en función de estas, identificar fácilmente los objetivos y planificar las actividades de monitoreo. Para la planificación de estas actividades se incluyen en esta sección estrategias diferenciales y lineamientos más detallados para el monitoreo participativo, recomendaciones para la ubicación de estaciones de monitoreo, referencias con procedimientos para la recolección, transmisión de datos y procesamiento de información.

7.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para la definición de estado del paisaje en términos de monitoreo hidroclimático, se proponen la siguiente guía de recopilación de datos, que recoge los principales elementos de la EMA (IDEAM et al., 2018), desarrollados en el ejercicio piloto a escala de paisaje (SIÉ Ingeniería et al., 2023) y que tiene como componentes principales:

- Identificación de procesos de ordenamiento del territorio que incluyan el paisaje de estudio.
- Identificación y de actores
- Identificación de aspectos culturales de gobernanza y socioeconómicos, asociados al monitoreo participativo
- Identificación de iniciativas de monitoreo y de variables monitoreadas
- Identificación de características diferenciales del paisaje de estudio
- Información de usos y coberturas para el paisaje de estudio
- Información de suelos para el paisaje de estudio
- Identificación de modelos hidrológicos disponibles para la región.

En un escenario real, gran parte de esta información ya tendría que conocerse, pues habría hecho parte del proceso para la selección del paisaje hidrográfico de estudio. Sin embargo, para abordar todas las situaciones, acá ofrecemos el conjunto completo de los componentes a considerar, de manera que también se oriente el trabajo a escala nacional para quienes tomen las decisiones sobre las áreas para la implementación de programas de monitoreo hidroclimático de la EMA. Las siguientes secciones amplían algunas de estas componentes y proponen referencias disponibles a nivel nacional y regional.

7.1.1. Identificación de procesos de ordenamiento del territorio que incluyan el paisaje de estudio

El objetivo es identificar actores, fuentes de información, instrumentos políticos o institucionales de gestión y características diferenciales importantes para el paisaje de estudio. La Tabla 13 presenta una relación de los principales procesos de ordenamiento del territorio.

| Tipo de proceso | Fuente de información |
|---|---|
| Áreas protegidas del sistema de Parques Nacionales Naturales | https://www.parquesnacionales.gov.co |
| Complejos de páramos delimitados con plan de manejo ambiental | Páginas web de corporaciones autónomas regionales (CARs) |
| Resguardos indígenas | DANE: Geovisor de información de resguardos del CNPV2018 |
| Reservas campesinas | http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2017/cap4/404/#seccion6 |
| Territorios colectivos de comunidades negras | https://geoportal.dane.gov.co/ (Atlas estadístico Tomo I Demográfico) https://geoportal.igac.gov.co/ (Mapa de tierras de comunidades negras) |
| Planes de ordenamiento y manejo de cuencas | Páginas web de corporaciones autónomas regionales (CARs) |
| Santuarios de flora y fauna | |
| Reservas naturales de la sociedad civil | Páginas web de alcaldías municipales, gobernaciones y (CARs) |
| Áreas de manejo especial | |
| Parques regionales naturales | |
| Distritos de manejo integrado | |

Tabla 13. Procesos comunes de ordenamiento territorial

Fuente: Elaboración propia

7.1.2. Identificación de actores

El objetivo es identificar instituciones, organizaciones e incluso personas que se consideran importantes para la planeación, diseño e implementación de un proyecto. Además, contribuye a definir estrategias y posibles arreglos institucionales para apoyar una iniciativa o garantizar el apoyo y el nivel de participación requerido, partiendo del conocimiento de algunas características y posibles relaciones entre actores (Cubas, 2010).

Los actores pueden tener presencia a diferentes escalas, provenir de diferentes sectores y tener diferentes intereses o potenciales de participación en la iniciativa. La Tabla 14 resume los principales tipos de actores según la escala en la que hacen presencia.

| Tipología de actores | Ejemplos de actores |
|----------------------|--|
| Nacionales | IDEAM, Instituto Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia |
| Regionales | CARs, alcaldías, gobernaciones, asociaciones productivas o cooperativas, ONG's, universidades, centros de investigación, empresas de aguas, empresas de energía, mineras, etc. |
| Locales | Juntas de acción comunal, instituciones educativas, organizaciones comunitarias, asociaciones/ juntas administradoras de acueductos comunitarios, asociaciones productivas o cooperativas. |

Tabla 14. Ejemplos típicos de actores

Fuente: Elaboración propia

7.1.3. Identificación de aspectos culturales de gobernanza y socioeconómicos, asociados al monitoreo participativo

Los aspectos culturales, de gobernanza y socioeconómicos de las comunidades de alta montaña, son claves para el desarrollo de programas de monitoreo comunitario y participativo. En general se distinguen tres grandes grupos determinantes de la visión del territorio, de los aspectos culturales y de gobernanza: los pueblos indígenas, los pueblos negros y las comunidades campesinas (Yepes et al., 2018). Entre estos, la mayor diversidad cultural puede encontrarse entre los pueblos indígenas, y guarda cierta correlación con los aspectos geográficos, presentándose características distintivas en la región caribe, la región andina, la región amazónica y en la región pacífica. En las comunidades campesinas y pueblos negros, algunos aspectos diferenciales importantes tienen que ver con las formas de tenencia de la tierra, el tamaño de los predios, las maneras tradicionales o tecnificadas de trabajo, el enfoque la ganadería, la agricultura o el agroturismo. La Tabla 15 ofrece algunas fuentes de información para la identificación de este tipo de aspectos.

| Referencia | Descripción |
|---|---|
| Definición de criterios para la delimitación de páramos del país. Parte I – Propuesta de tipologías socioecológica (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010) | Presenta una serie de criterios para establecer tipologías socioecológicas en páramos que incluyen variables como el clima, el régimen de propiedad, el patrón de asentamiento, los usos del suelo, y los niveles o tipos de organización social. |
| Informe técnico: Caracterización poblacional de áreas de páramo a partir de los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV 2018) | Informe elaborado por el DANE con información de variables del censo de población del año 2018 para cada uno de los complejos de páramos del país |
| Estudio Técnico Económico Social Ambiental de los complejos de páramos | Insumos técnicos para la reglamentación de los complejos de páramos que incluyen información social y económica desagregada por los municipios pertenecientes a cada complejo |
| POMCAS, Planes de manejo de complejos de páramos y de Parques Naturales, planes de desarrollo de reservas campesinas y planes de ordenamiento territorial | Instrumentos de planificación que contienen información general que incluye datos sociales y económicos |
| REDATAM: Recuperación de datos para áreas pequeñas por microcomputador | Herramienta del DANE con información de variables de los censos de los años 2005 y 2018 a diferentes escalas que incluye las de sectores censales, aptas para trabajar en la escala de paisajes |

Tabla 15. Fuentes de información para identificación de aspectos culturales, de gobernanza y socioeconómicos

Fuente: Elaboración propia

7.1.4. Identificación de iniciativas de monitoreo

Las principales iniciativas de monitoreo a nivel nacional para las diferentes escalas de trabajo se presentan en la EMA (IDEAM et al., 2018), y las de interés hidroclimático y afines se presentaron en la sección 3.7 de este documento. De particular interés son aquellos paisajes hidrográficos de alta montaña que cuentan con monitoreo de niveles o caudales (ver Figura 6, sección 3.7.1 y Anexo I), pues son el insumo básico para la implementación de modelos hidrológicos que permiten alcanzar algunos de los objetivos más complejos de la EMA, y conectarlos con la modelación hidrológica de los complejos de páramos (sección 6.4.3).

7.1.5. Identificación de características diferenciales del área de estudio

Las características diferenciales de un paisaje que atañen al monitoreo hidroclimático se sintetizaron en la Tabla 11 de la sección 6.4.2. Las principales fuentes de información para identificarlas corresponden a los instrumentos de planificación citados en la Tabla 13 de la sección 7.1.1. Adicional a estos se recomienda el documento Atlas de Páramos (Morales et al., 2007), y la descarga de la cartografía de los complejos de páramo para analizar en conjunto con otras variables espaciales. Esta cartografía se puede obtener de manera libre en la página web del Instituto Humboldt.

7.1.6. Información de usos y coberturas para la región de estudio

Las principales referencias para obtener la cartografía de usos y coberturas corresponden a las instituciones que formulan los instrumentos de planificación citados en la Tabla 15 de la sección 7.1.3. Estos pueden complementarse con estudios de impacto ambiental que incluyan la región de estudio y a los que puede accederse por medio de las CARs o de la ANLA. De manera complementaria también se recomienda la revisión del documento “Informe Final de la Componente de Coberturas de la Tierra en los Páramos Priorizados a Escala 1:25.000” (Instituto Humboldt, 2014) que incluye el análisis de coberturas de 21 complejos de páramo. En caso de información insuficiente la sección 7.3.5 presenta los referentes nacionales para la elaboración de mapas de coberturas.

7.1.7. Información de suelos

Para el caso de implementación de modelos hidrológicos, o para el estudio de aspectos de detalle del balance hidrológico, la información de suelos se configura en un insumo fundamental. La principal fuente de información a nivel nacional corresponde a los estudios realizados por el IGAC, que, para el caso de páramos en convenio con el Instituto Humboldt, evaluó 1.4 millones de hectáreas distribuidas en 12 distritos de páramos en 20 departamentos del país, entregando la correspondiente cartografía de suelos a escala 1:25000 (IGAC, 2015). A mayor detalle, la misma entidad elaboró para la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR estudios de suelos a escala 1:10000 de más 180000 ha de páramos correspondiente a 6 complejos de páramo entre los departamentos de Cundinamarca y Boyacá (IGAC, 2021).

7.1.8. Identificación de modelos hidrológicos disponibles para la región

Las instituciones académicas con facultades o programas de pregrado o posgrado en ingeniería civil, ambiental, recursos hídricos o hidrología, suelen contar con estudios hidrológicos que los convierte en una buena fuente de información. La sección 4.5, presenta algunas de las universidades en Colombia y centros de investigación en temáticas de hidrología en alta montaña, que constituyen otro importante referente.

7.2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

Con la información anterior, el equipo de trabajo para la formulación de la propuesta de monitoreo puede establecer las características diferenciales, y las condiciones iniciales del paisaje de estudio para definir los

objetivos inmediatos, cercanos, y subsecuentes de monitoreo. A continuación (Tabla 16), se relacionan los objetivos identificados en la sección 6.5 con las principales actividades y variables a medir, para relacionarlos directamente con la siguiente la sección, donde se presentan tablas detalladas de referencia a documentos de consulta.

| Referencia | VARIABLES A MONITOREAR/ACTIVIDADES PARA ALCANZAR EL OBJETIVO |
|---|--|
| Objetivos orientados a la caracterización hidroclimática (O_CHC) | Análisis de series, espacialización de información, estadística básica, etc. |
| Objetivos orientados a la conexión directa con impactos de cambio en coberturas (O_Icob). Se asume disponibilidad de series de caudales | Dinámica de coberturas |
| Objetivos orientados a la conexión directa con impactos de tipo climático (O_ICli): Se asume disponibilidad de series de caudales del orden de décadas | Dinámica de coberturas |
| Objetivos orientados a monitoreo tipo iMHEA (O_iMHEA): | Precipitación y Caudales. Recuperación o mantenimiento de estaciones en desuso o no operativas |
| Objetivos orientados al balance hídrico y la modelación hidrológica (O_BMH). | Adición de estaciones automáticas de precipitación, o caudales, recuperación o mantenimiento de estaciones en desuso o no operativas |
| Modelación hidrológica distribuida de impacto de cambios en coberturas (O_MIHCob). Se asume disponibilidad de series de caudales y precipitación | Dinámica de coberturas |
| Modelación hidrológica distribuida de impactos climáticos (O_MHICli). Se asume disponibilidad de series de caudales y precipitación | Dinámica de coberturas, escenarios de cambio climático |
| Modelación hidrológica distribuida de escenarios de riesgo (O_MHRi). Se asume disponibilidad de series de caudales y precipitación | Dinámica de coberturas, establecimiento de escenarios de riesgo |
| Objetivos asociados al refinamiento de los modelos hidrológicos y a la profundización del conocimiento de los componentes del balance hidrológico (O_RefBH1, 2, 3 y 4): | Modelación de fusión de glaciares Intercepción/Precipitación Horizontal Modelación hidrológica de lagunas y zonas húmedas Propiedades hidrológicas de suelos Flujos subterráneos Evapotranspiración Humedad relativa |
| Monitoreo de estado o diagnóstico por comunidades | Caudales (manual) |
| Monitoreo de variables climáticas por comunidades | Temperatura, precipitación, humedad relativa |
| Monitoreo de dinámicas locales de oferta y regulación hídrica por comunidades | Dinámica de cobertura, caudales, precipitación |
| Monitoreo contributivo y colaborativo | Intercepción/Precipitación Horizontal Propiedades hidrológicas de suelos |

Tabla 16. Síntesis de relaciones entre objetivos propuestos y monitoreo de variables para su alcance

Fuente: Elaboración propia

7.3.PLAN DE MONITOREO

Una vez establecidos los objetivos se define el plan de monitoreo para su alcance, es decir el conjunto de acciones que se estiman necesarias para el cumplimiento progresivo de los objetivos de monitoreo. En caso de incidencia de comunidades en la región de estudio se recomienda trabajar paralelamente la estrategia de monitoreo comunitario participativo para integrarla en la mayor medida posible a la estrategia de la EMA. La planificación incluye, además: las estrategias para obtención de información, los programas complementarios de monitoreo, la identificación de estaciones para reparación, la ubicación de las estaciones de monitoreo de nuevas variables, las técnicas de monitoreo para captura de datos, los métodos para recolección y transmisión de la información, el análisis de datos, la estrategia de comunicación de resultados, y los mecanismos de financiamiento.

El conjunto de estas actividades puede ubicarse en dos grandes grupos, según tengan un carácter más estratégico o un carácter más práctico, sin que sea exclusivamente de uno u otro tipo. Por lo general la parte estratégica es previa a la parte práctica, por ejemplo, antes de seleccionar una tecnología para la medición de una variable, habrá que haber planteado una estrategia que involucra actores, recursos y tiempos, que posibiliten la medición de esa variable. A continuación, se amplían las principales actividades para el diseño del plan de monitoreo.

7.3.1.Monitoreo comunitario participativo

Los aspectos generales para el diseño de un programa de monitoreo comunitario se presentaron en la sección la sección 6.3 tomando como referencia las recomendaciones del PMIP-AM. Sin embargo, PMIP-AM no desarrolla temas importantes como el enfoque diferencial ni profundiza en las metodologías para la realización de actividades de la fase 1 (Aprestamiento institucional), de la fase 2 (Diagnóstico deliberativo) y de la fase 3 (Implementación del monitoreo). La Tabla 17, presenta algunos documentos y directrices que se ponen a consideración para complementar el PMIP-AM (IDEAM, 2022b), y para el desarrollo de la estrategia de monitoreo comunitario para la componente hidrológica.

7.3.2.Arreglos entre actores para el desarrollo de objetivos de monitoreo

Parte del éxito de una estrategia de monitoreo, implica la generación de conexiones con otros actores, que contribuyan al alcance de los objetivos perseguidos. En su forma más simple las interacciones entre actores buscan el acceso a la información y el uso compartido de esta, pero pueden incluir arreglos para generación de nueva información, para el apoyo a programas de monitoreo comunitario y para la implementación de estrategias de conservación, restauración y reconversión productiva. El plan de monitoreo deberá por tanto contar con estrategias para generar conexiones entre actores que den soporte al alcance de los objetivos de monitoreo planteados

7.3.3.Programas complementarios de monitoreo

Para lograr algunos de sus objetivos, la EMA puede requerir del diseño de programas complementarios de monitoreo. el ejemplo más directo es el de las iniciativas tipo iMHEA. En cualquier caso, en esta parte del plan deberán definirse unos actores, posiblemente arreglos entre actores como se mencionó en la anterior sección, estudios técnicos, recursos económicos y humanos entre otros.

| Referencia | Aspectos relevantes de la referencia para el monitoreo participativo |
|--|---|
| Caminos para la restauración ecológica en territorios indígenas en páramo (Armero & Galvis, 2021). | Enfoque diferencial para comunidades indígenas |
| Definición de criterios para la delimitación de páramos del país. Parte I – Propuesta de tipologías socioecológica (MAVDT & Instituto Humboldt, 2010). | -Complemento Fase 1: Plantea una serie de características socioeconómicas y culturales que deben ser observadas en los páramos para determinar sus categorías socioculturales -Clasificación de tipologías de actores o comunidades en páramos útil para la caracterización de actores -Complemento Fase 2:y Fase 3: Presenta estrategias específicas para el diagnóstico territorial y para la implementación del monitoreo, principalmente desde el punto de vista de la restauración ecológica |
| Guía práctica para el monitoreo participativo de gobernanza (Evans et al., 2016). | Enfoque de género |
| Lineamientos para el monitoreo comunitario participativo en Colombia (Yepes et al., 2018), | Complemento Fases 1, 2 y 3 y lista de ejemplos de iniciativas de monitoreo para consultar. |
| Análisis participativo del uso de la tierra y la calidad de vida en dos páramos de Venezuela: importancia para el diseño de estrategias de conservación (Smith et al., 2014) | Complemento Fase 3 a través de estrategia para medición de indicadores de calidad de vida y bienestar humano en el monitoreo participativo en regiones de páramos |
| Programa de capacitación en monitoreo participativo dirigido a comunidades locales diseñado y puesto en marcha (A. M. Hernández et al., 2021) | Complemento Fase 3, con herramientas de capacitación para comunidades locales |
| Red de monitoreo comunitario del clima (Holguín & Cusquen, 2021) | Clima en alta montaña |
| Lineamientos metodológicos de monitoreo comunitario intercultural (Fundación Natura, 2020) | General |

Tabla 17. Aspectos complementarios para el desarrollo del monitoreo participativo comunitario de la EMA

Fuente: Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

7.3.4. Cantidad y emplazamiento de estaciones de monitoreo

Debido a la diversidad de objetivos, y a la variedad de parámetros que se plantea la EMA-LHC, los criterios para la cantidad de estaciones de monitoreo no son únicos. Como punto de partida pueden tomarse las recomendaciones de la iniciativa iMHEA (Céleri et al., 2012), en la que se propone como mínimo una estación de caudal al cierre del área hidrográfica y dos estaciones pluviométricas, de las cuales una debe estar ubicada preferiblemente cerca de la estación de caudal. Esta estrategia de monitoreo mínimo también puede aplicarse para los casos de monitoreo comunitario.

En un siguiente nivel de instrumentación para la EMA-LHC, se proponen estaciones pluviométricas al menos en cada franja del gradiente altitudinal para capturar la variabilidad espacial, y monitoreo de caudales en el cierre y en un punto interior del área hidrográfica, que pueda utilizarse para validación de modelos hidrológicos y para el estudio de dinámicas hidrológicas de ecosistemas específicos. A partir de este punto, pueden complementarse los procesos de instrumentación para el estudio de las variables de detalle del balance hidrológico (sección 6.5.1), con monitoreo a escala de ecosistemas y parcelas (sección 6.4.4).

Los criterios para el emplazamiento de estaciones de monitoreo pueden encontrarse en las referencias de la Tabla 18 y corresponden a las directrices de los documentos “Guía para el emplazamiento de las estaciones

meteorológicas” (IDEAM, 2021), “Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua” (IDEAM & INVERMAR, 2021) y “Guía de Instrumentos y Métodos de Observación. Volumen I –Medición de variables meteorológicas” (OMM, 2021). Cada instrumento de medida tiene condiciones específicas para su correcta operación, aunque también es común la instalación de estaciones de medida de múltiples variables como las estaciones meteorológicas que cuentan con sensores para temperatura, precipitación, humedad, velocidad y dirección del viento entre otras.

Para el caso particular de pluviómetros, los alrededores del instrumento no deben tener barreras como árboles o arbustos y en caso de que existan, el instrumento debe estar retirado por una distancia mínima del doble de la altura de la barrera. La Figura 19 sintetiza las principales recomendaciones para la ubicación de pluviómetros tomada de la sección 7.1.1 del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua (IDEAM & INVERMAR, 2021).

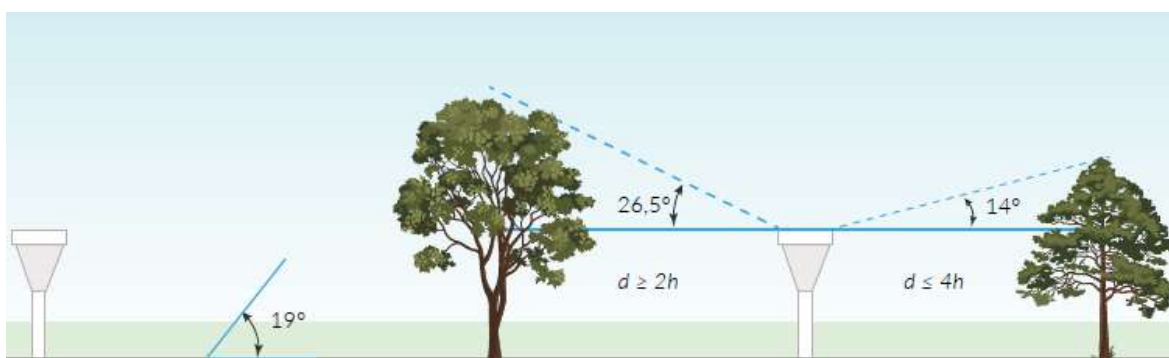


Figura 19. Ubicación de un pluviómetro

Fuente: Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del agua (IDEAM & INVERMAR, 2021) adaptado de OMM

Las referencias de la Tabla 18 entregan información similar y mayores detalles a los mostrados en el anterior ejemplo.

7.3.5. Métodos y técnicas de monitoreo

La Tabla 19 presenta referencias útiles para la consulta de métodos y tecnologías de monitoreo que corresponden a las directrices de los documentos de la sección anterior, a las que se adiciona lo presentado en el Protocolo de monitoreo integrado y participativo de la alta montaña (IDEAM, 2022b), y algunas guías para monitoreo de carbono que incluyen medición de propiedades de suelos, relevantes desde el punto de vista hidrológico.

| Referencia | Variable | Ubicación en la referencia |
|---|-------------------------------|---|
| Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos – Iniciativa iMHEA (Céleri et al., 2012) | Precipitación | Sección 4.2.2, pg. 11 Sección 4.5.1, pg. 13 |
| | Caudal | Sección 4.2.2, pg. 9 |
| Guía para el emplazamiento de las estaciones meteorológicas (IDEAM, 2021) | Temperatura | Sección 6.1, pg. 13 |
| | Humedad del aire | Sección 6.1, pg. 13 |
| | Precipitación | Sección 6.2, pg. 14 |
| | Evaporación | Sección 6.4, pg. 15 |
| | Viento superficie | Sección 6.3, pg. 15 |
| Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua (IDEAM & INVERMAR, 2021) | Precipitación | Sección 7.1.1 pg. 95 |
| | Caudales | Sección 8.1.2.1 pg. 147 |
| | Aguas subterráneas | Sección 9.1.1, pg. 442 |
| | Monitoreo isotópico | Sección 10.1.1, pg. 502 Sección 10.2.1, pg. 521 |
| Los Páramos de Colombia Características Biofísicas, Ecohidrología y Cambio Climático (Tobón, 2022) | Intercepción de precipitación | Sección 7.2.2, pg. 280 |
| | Intercepción de la niebla | Sección 8.2.2, pg. 316 |
| Guía de Instrumentos y Métodos de Observación. Volumen I –Medición de variables meteorológicas (OMM, 2021) | Temperatura | Secciones 2.2.3, 2.3.3 y 2.4.3 pgs. 117, 124 y 129. |
| | Humedad | Secciones 4.2.4, 4.3.2.3, 4.4.4 y 4.6.4, pgs. 183, 192, 200 y 204 |
| | Precipitación | Sección 6.2, pg. 250 |
| | Evapotranspiración | Sección 10.3.5 pg. 383 Sección 10.4.2 pg.387 |

Tabla 18. Referencias con lineamientos para emplazamiento de estaciones de monitoreo hidroclimático y afines

Fuente: Elaboración propia

| Referencia | Variable | Localización en el documento | |
|--|--|--|--------------------------|
| Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos – Iniciativa iMHEA (Célleri et al., 2012) | Precipitación | Sección 4.2.2, pg. 9 | |
| | Caudal | Sección 4.2.2, pg. 9 | |
| Protocolo de monitoreo integrado y participativo de la alta montaña (IDEAM, 2022b) | Temperatura | Sección 8, pg. 80 | |
| | Humedad relativa | Sección 8, pg. 81 | |
| | Precipitación | Sección 8, pg. 64 | |
| | Caudal | Sección 8, pg. 69 | |
| | Coberturas | Sección 6, pg. 38 | |
| | Glaciares (balance de masa y área) | Sección 9, pg. 88 | |
| | Variables socioeconómicas y culturales | Sección 11, pg. 168 | |
| | Suelos y carbono en suelo | Sección 7, pg. 46 | |
| | Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua (IDEAM & INVERMAR, 2021) | Caudal | Sección 8.1.2.3, pg. 148 |
| | | Nivel | Sección 8.1.1.3, pg. 131 |
| Precipitación | | Sección 7.1.3, pg. 97 | |
| Evapotranspiración | | Sección 7.2.6, pg. 114 | |
| Glaciares | | Sección 8.1.3.3, pg. 201 | |
| Aguas subterráneas | | Sección 9.1.3, pg. 447 | |
| Isotopía | | Secciones 10.1.3, 10.2.3 y 10.3.3, pgs. 521, 503 y 528 | |
| Sedimentos | | Sección 8.1.4, pg. 215 | |
| Calidad del agua | | Sección 8.2, pg. 310 | |
| Guía de Instrumentos y Métodos de Observación. Volumen I –Medición de variables meteorológicas (OMM, 2021) | | Temperatura | Sección 2.1.4, pg. 104 |
| | Humedad | Sección 4.1.4, pg. 176 | |
| | Precipitación | Sección 6.1.4, pg. 248 | |
| | Evapotranspiración | Sección 10.1.4, pg. 380 | |
| | Viento | Sección 5.3, pg. 231 | |
| | Radiación | Sección 7.1.4, pg. 285 | |
| Los Páramos de Colombia Características Biofísicas, Ecohidrología y Cambio Climático (Tobón, 2022) | Intercepción de precipitación | Sección 7.2.2, pg. 280 | |
| | Intercepción de la niebla | Sección 8.2.2, pg. 316 | |
| Protocolo para el monitoreo del ciclo del carbono en ecosistemas de alta montaña (Ribes et al., 2004) | Carbono y propiedades de suelos | -- | |
| | Carbono y propiedades de suelos | -- | |

Tabla 19. Referencias con lineamientos metodológicos y técnicas para el monitoreo de variables hidrometeorológicas y afines

Fuente: Elaboración propia

Como ejemplo, la sección 7.1.3 del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua (IDEAM & INVERMAR, 2021), establece para la medición de precipitación el uso de pluviómetros y pluviógrafos. Dentro de los

pluviómetros existen equipos digitales como el de balancín que consta de un embudo que conduce el agua a un pequeño columpio cuyos platos son cubetas triangulares de plástico o metal (Figura 20).



Figura 20. Pluviómetro de Balancín

Fuente (López, 2019) en Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del agua (IDEAM & INVERMAR, 2021)

Al caer la lluvia, los balancines se activan al entrar el agua a través del embudo, lo cual genera un volcamiento de estos; cuando el agua se derrama, se cierra un circuito eléctrico y queda listo el plato opuesto para repetir el mismo proceso. Esta alternancia es registrada mediante un contador que transmite la información como señal y queda almacenado en el sistema central; cada balanceo equivale a un registro de precipitación, normalmente de 0.2 mm, expresada en mm/h.

La selección de un equipo o tecnología en particular dependerá de los objetivos de monitoreo, de los recursos económicos, de los recursos humanos, de las características del sitio etc., aspectos que deberán ser analizados en el contexto de cada situación. La tendencia es a la instrumentación con equipos de medida que permitan las lecturas automáticas de datos, con un grado aceptable de confiabilidad, alta frecuencia de registro y bajas necesidades de mantenimiento. Sin embargo, pueden existir casos donde el uso de tecnologías más simples que involucren más a las comunidades, favorezcan el logro de objetivos de monitoreo participativo (e.g. proyectos de educación ambiental).

7.3.6.Recolección/transmisión de datos

Los lineamientos generales para la recolección y transmisión de datos se presentan en las secciones 6.2, 6.3, y 6.4 del Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua (IDEAM & INVERMAR, 2021). Recomendaciones adicionales dependen del tipo de variable y del equipo de medición.

7.3.7.Comunicación de resultados

El PMIP-AM 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.

En el RED-Río Claro se propone la divulgación de la información de monitoreo recopilada a escala de paisajes, en plataformas locales, regionales y nacionales de información climática, social y ambiental. A nivel nacional se tiene las plataformas del IDEAM y del Instituto Humboldt. A nivel regional se proponen las plataformas administradas por las CAR, institutos ambientales regionales, universidades, o centros de

investigación en temáticas afines. A nivel comunitario se proponen boletines ambientales, con mecanismos de difusión en redes sociales o desde instituciones educativas.

7.3.8. Estrategias de financiamiento

La sostenibilidad y el éxito de los planes de monitoreo en alta montaña pueden lograrse mediante la gestión comunitaria local e institucional y una estrategia financiera efectiva para captar fondos destinados al desarrollo de programas y proyectos de monitoreo. Entre las fuentes de financiamiento se consideran los presupuestos territoriales para medio ambiente, alianzas o convenios con organizaciones e instituciones locales, departamentales, nacionales e internacionales, así como la generación de ingresos a través de productos ecoturísticos (CARDER et al., 2023). Algunas alternativas de financiación, e incentivos económicos se presenta a continuación:

- Regalías: Asignación para la Inversión Local - Ambiente y Desarrollo Sostenible
- Transferencias del sector eléctrico.
- Transferencia del 1% en proyectos sujetos a licenciamiento ambiental
- Tasas retributivas y compensatorias
- Incentivos tributarios (Exenciones al impuesto predial)
- Certificado de Incentivo Forestal (CIF de Conservación – CIF de Producción)
- Esquemas de pago por servicios ambientales
- Cooperación internacional y fondos.
- Ecoturismo y belleza escénica y paisajística

Otras fuentes de financiación pueden ser los recursos para proyectos de investigación enfocados al recurso hídrico y conservación del medio ambiente. Sin embargo, para proyectos de largo plazo puede ser necesario volver a las alternativas iniciales.

8. ESTUDIO DE CASO RIO CLARO



En el ejercicio piloto para la generación de reportes de estado y dinámicas en el marco de la EMA (SIÉ Ingeniería et al., 2023), se seleccionó un área de estudio (ADE) ubicada en la parte alta de la cuenca de Río Claro (Villamaría – Caldas, ver Figura 21). Esta ADE es emblemática para el contexto colombiano, ya que cuenta con múltiples iniciativas de monitoreo e investigación,

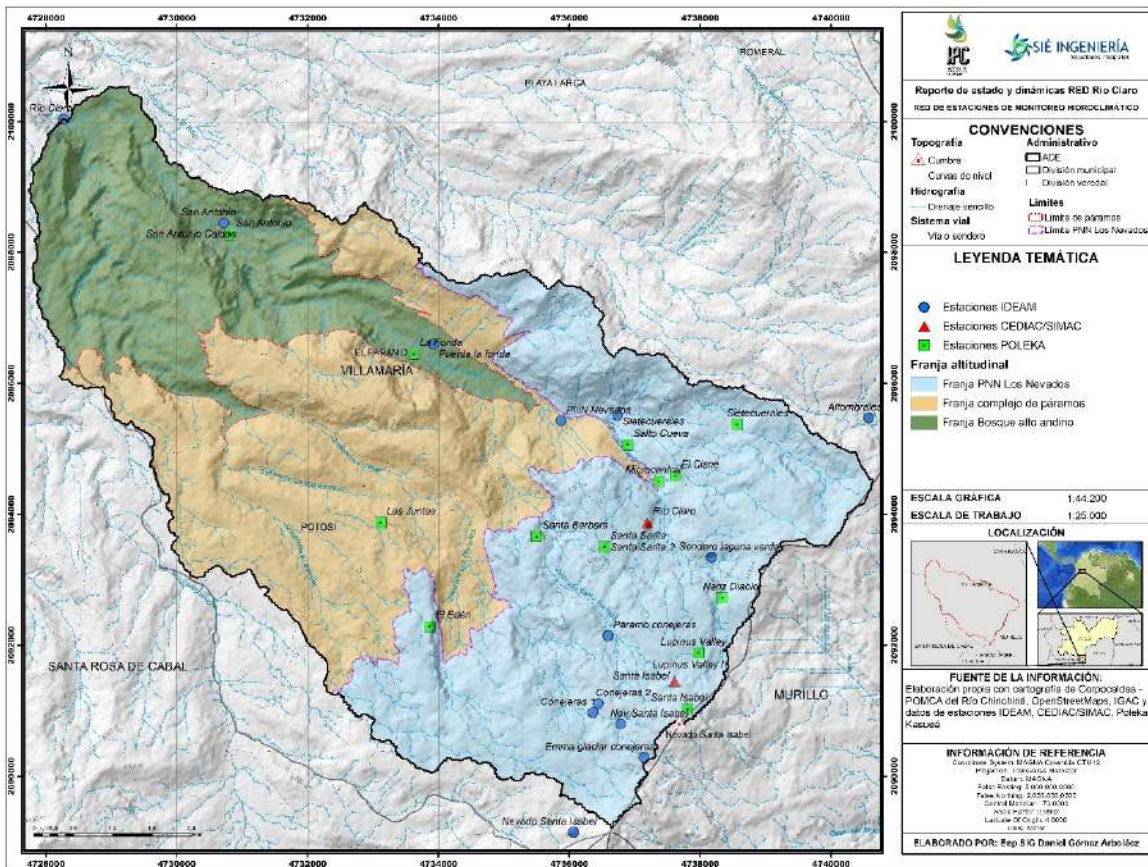


Figura 21. Área de estudio (ADE) ejercicio piloto Río Claro y estaciones de monitoreo hidroclimático

Fuente: Geodatabase RED Río Claro (Fundación IPC, SIÉ Ingeniería, & CONDESAN, 2023)

Parte esta zona está incluida en el complejo de páramos Los Nevados y el Parque Nacional Natural (PNN) Los Nevados, y comprende una porción del glaciar del nevado Santa Isabel.

Durante las últimas décadas esta cuenca ha sufrido importantes procesos de transformación en sus coberturas sobre todo en la parte baja por fuera de la franja del PNN Los Nevados. La Figura 22, presenta las

coberturas del área de estudio (ADE) para el año 2006 y la Figura 23 corresponde al año 2018, donde el color verde claro representa las áreas de pastos limpios, y el color verde oscuro los bosques y áreas seminaturales.

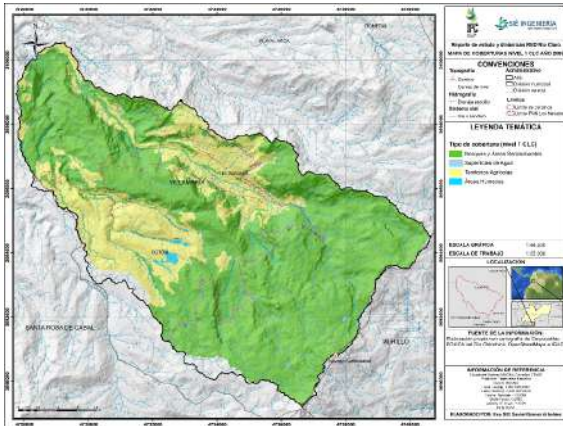


Figura 22. Coberturas año 2006

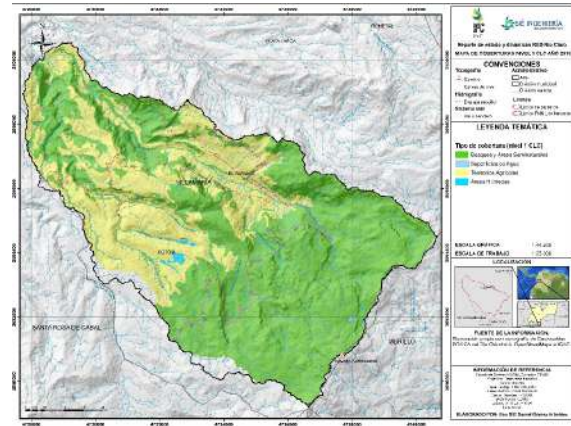


Figura 23. Coberturas año 2018

Fuente: Geodatabase RED Rio Claro (Fundación IPC, SIÉ Ingeniería, & CONDESAN, 2023)

La dinámica de los cambios en las coberturas para el nivel 1 de la leyenda Corine Land Cover se presenta en la Tabla 20 y se resumen en la Figura 24. En ella, aparecen en barras, las coberturas expresadas en hectáreas de cada tipo de cobertura para el año 2006 (barras grises), y para el año 2018 (barras azules). Adicionalmente se presentan las áreas que se perdieron para cada tipo de cobertura (barras rojas) y las áreas que se incrementaron (barras verdes). Para las pérdidas se adicionaron etiquetas, que indican la reducción porcentual (porcentajes negativos asociados a barras rojas) de cada cobertura en el intervalo de 12 años entre los períodos en que se elaboraron los mapas (2006-2018). De manera análoga las etiquetas de las barras verdes, indican los porcentajes de aumento de sus respectivas coberturas en el período 2006-2018 (SIÉ Ingeniería et al., 2023)

| Tipo cobertura | 2006 | 2018 | Aumento | Pérdida | %Cambio |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Bosques y áreas seminaturales | 5173.29 | 4612.43 | 0.00 | 560.86 | -11% |
| Territorios agrícolas | 1783.35 | 2346.25 | 562.90 | 0.00 | 32% |
| Áreas húmedas (zonas húmedas) | 20.90 | 20.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00% |
| Superficies de Agua | 5.40 | 3.37 | 0.00 | 2.03 | -38% |

Tabla 20. Dinámica de coberturas para el nivel uno de clasificación (datos en hectáreas)

Fuente: RED Rio Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023) con cartografía de Corpocaldas, POMCA Rio Chinchiná

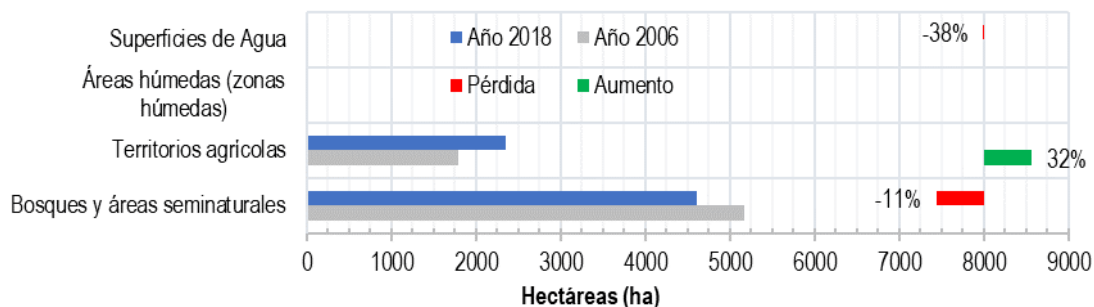


Figura 24. Dinámica de cambios en coberturas para el ADE, Nivel 1 CLC entre los años 2006-2018

Fuente: RED Río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023) con cartografía de Corpocaldas POMCA Río Chinchiná

Los resultados para este nivel de análisis muestran una pérdida en la cobertura de bosques y áreas seminaturales de más de 560 ha. Entre tanto el aumento en los territorios agrícolas fue de 562 ha, las coberturas de zonas húmedas se mantuvieron constantes, mientras las superficies de agua (que para este caso corresponden a lagos, y lagunas del nivel 3 del CLC), experimentaron una pérdida de 2.03 ha. Si bien, este último cambio puede parecer bajo, en realidad es un número significativo, pues corresponde a una pérdida del 38% del área de lagos y lagunas respecto al año 2006 (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

8.1.RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

La Tabla 21 presenta una síntesis de la información recopilada para el ADE de Río Claro, siguiendo las recomendaciones de la sección 7.1, y tomando los resultados de RED Río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023)

| Variable | Localización en el documento |
|---|---|
| Identificación de procesos de ordenamiento del territorio que incluyan el paisaje de estudio. | POMCA Río Chinchiná, Plan de Manejo Ambiental del Parque Nacional Natural Los Nevados, Plan de Manejo Ambiental de Complejo de Páramo de Los Nevados |
| Identificación y de actores | Nacionales: IDEAM, Instituto Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia |
| | Regionales: Corporación Autónoma Regional de Caldas, Comisión Conjunta del Complejo de Páramo de Los Nevados, PNN Los Nevados, Gobernación de Caldas, Alcaldía de Villamaría, Corporación Fondo del Agua Vivo Cuenca, Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC, Alcaldía de Chinchiná, Fundación Pangea, Observatorio Poleka Kasue, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, SIMAC, CEDIAC, IDEA, GTA en Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Javeriana, Escuela de Ingeniería de Antioquia, entre otros. |
| | Locales: Propietarios y habitantes de la región, asociaciones de turismo |

| Variable | Localización en el documento |
|---|--|
| Identificación de aspectos culturales de gobernanza y socioeconómicos, asociados al monitoreo participativo | Las principales actividades económicas referenciadas en el área de estudio, corresponden a ganadería, agricultura y turismo. El área de estudio presenta múltiples dificultades para el desarrollo de procesos de gobernanza con habitantes del territorio que se derivan de características como: i) La falta de capacidad de decisión del habitante sobre el uso del predio. La decisión sobre la vocación del uso del suelo, o el cambio en las prácticas agrícolas y ganaderas, corren en gran medida bajo la tutela del propietario y no del tenedor. ii) La desaparición de la junta de acción comunal y de la escuela rural de la vereda Potosí. Estos eran espacios naturales desde donde se habría facilitado la configuración de procesos de gobernanza a nivel local. iii) La baja densidad de población, la extensión y distancias entre los predios, que dificultan la movilidad y agrupación de los actores. iv) La alta movilidad de la población (población flotante), que dificulta la implementación y sostenimiento de procesos a mediano y largo plazo |
| Identificación de iniciativas de monitoreo y de variables monitoreadas | Cuatro entidades (IDEAM, CDIAC, CHEC y el Observatorio Poleka Kasue) generan información hidroclimática en el área de estudio. La mayor densidad de estaciones se tiene en la franja altitudinal del PNN Los Nevados y en la franja de páramos, y la densidad más baja en la franja de bosque altoandino. Según lo reportado por estas entidades, las estaciones registran principalmente información de precipitación, temperatura, nivel y caudal. Adicionalmente el IDEAM realiza monitoreo de glaciares en el ADE. La Figura 21 presentó la ubicación de las estaciones y la entidad a la que pertenece. |
| Identificación de características diferenciales del paisaje de estudio | Las principales características diferenciales del paisaje son, la presencia del glaciar de Santa Isabel, zonas húmedas, la franja protegida del PNN Los Nevados, y zonas altamente transformadas en las franjas inferiores. |
| Información de usos y coberturas para el paisaje de estudio | La información de usos y coberturas de mayor interés corresponde a la del POMCA del Río Chinchiná del año 2006 y una actualización realizada para el año 2018. Los mapas se elaboraron siguiendo la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010c) |
| Información de suelos para el paisaje de estudio | La información mas completa y de mayor detalle para suelos corresponde a los estudios realizados por Corpocaldas en el marco del POMCA del Río Chinchiná. |
| Identificación de modelos hidrológicos disponibles para la región. | Corpocaldas, la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, su Instituto de Estudios Ambientales IDEA, y el grupo de investigación de la misma universidad "Grupo de Trabajo Académico en Hidráulica y Ambiental", han trabajado en implementación de modelos hidrológicos en el departamento de Caldas y en la región de alta montaña del departamento. |

Tabla 21. Síntesis de información recopilada para el área de estudio de Río Claro

Fuente: Elaboración propia

8.2. ESTADO ACTUAL Y DEFINICION DE OBJETIVOS DE MONITOREO

De acuerdo a lo establecido en las secciones 7.2 y 6.5, y la síntesis de información de la sección anterior, el ADE de Río Claro cuenta con información de variables de temperatura, caudales, precipitación y dinámica de coberturas en una franja de tiempo que permite realizar directamente una primera aproximación a objetivos asociados a modelación hidrológica distribuida de impacto de cambios en coberturas (O_MHcob). Adicionalmente gracias a la disponibilidad de información de monitoreo del área glaciar, es posible refinar el modelo hidrológico (O_RefBH1) integrando los aportes de la fusión de nieve. Los objetivos previos a los mencionados que también pueden lograrse corresponden a los asociados a la caracterización hidroclimática (O_CHC).

Como objetivos más cercanos pueden plantearse la recuperación de estaciones de monitoreo (O_REM) y el refinamiento de modelos hidrológicos (O_RefBH2), con información a la que no se pudo acceder para este estudio, o que no cubría por completo el área de estudio y que incluye, mapas de suelos que capturen la dinámica de coberturas, incidencia de superficies húmedas, y parámetros hidrológicos específicos de vegetación del área de estudio, a partir de información actualizada de programas de monitoreo como el realizado por el Observatorio Poleka Kasue, y los estudios de suelos realizados en páramos por el IGAC y el Instituto Humboldt (IGAC, 2015). Finalmente, la presencia de estaciones de monitoreo de caudales en zonas interiores del área de estudio la información de coberturas, permiten la evaluación de la implementación de estrategias de monitoreo tipo iMHEA, que se expone en las secciones 3.7.4, 6.4.1 y 6.5.1

A mediano y largo plazo pueden lograrse objetivos asociados a modelación hidrológica distribuida de impactos climáticos, en la media en que las series temporales alcancen una duración suficiente (O_MHcli), y refinamiento de modelos hidrológicos que incluyan variables de monitoreo que actualmente no se miden (O_RefBH4) como precipitación horizontal y flujos de aguas subterráneas. La Tabla 22 resume los objetivos de monitoreo para el área piloto de Rio Claro.

| Objetivo | Descripción |
|--|--|
| Objetivos alcanzables con la información disponible | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Caracterización hidroclimática del área de estudio ▪ Evaluación para iniciativas tipo MHEA ▪ Modelación hidrológica distribuida para estimación de impactos de cambios en coberturas ▪ Refinamiento de modelo hidrológico - dinámica de glaciares |
| Objetivos subsiguientes (perspectivas) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Calibración / recuperación de estaciones de monitoreo ▪ Refinamiento del balance hidrológico, con información primaria de monitoreo de vegetación y suelos (Poleka Kasue) ▪ Actualización monitoreo de coberturas y modelación complejo de páramos |
| Objetivos a largo plazo (perspectivas) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Profundización del conocimiento de componentes del balance hídrico en páramos: monitoreo de precipitación horizontal y aguas subterráneas ▪ Implementación iniciativas tipo iMHEA |

Tabla 22. Objetivos de monitoreo de alcance progresivo para el área piloto de Rio Claro

Fuente: Elaboración propia

Las dificultades en los procesos de gobernanza mencionados en la Tabla 21 de la sección anterior, obstaculizan por el momento el desarrollo de objetivos asociados al monitoreo comunitario.

8.3.DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO

8.3.1.Análisis de microcuencas para implementación de monitoreo iMHEA

El área hidrográfica de estudio cuenta con estaciones de monitoreo interiores en 4 microcuencas que pueden tener potencial para la implementación de estrategias tipo iMHEA como se muestra en la Figura 25. El análisis de coberturas muestra que, de las cuatro microcuencas, Siete Cuerales y San Antonio y, tienen las mejores características para la implementación de iniciativas tipo iMHEA. En el primer caso, la cuenca tiene un 77.67% de coberturas de Herbazal de acuerdo al nivel 3 de la leyenda Corine Land Cover para el año 2018, pero se necesita el mantenimiento de la estación para que continúe capturando información. En el caso de la microcuenca San Antonio, se cuenta con un 71.76 % de cobertura de bosque denso, por lo que se requiere

intervención para conservar las coberturas actuales. En este caso, aunque no se cumpla estrictamente con el criterio de homogeneidad de coberturas de la iMHEA (sección 6.4.1), la implementación de la estrategia, puede resultar de mucha ayuda para la conservación y recuperación de sus coberturas.

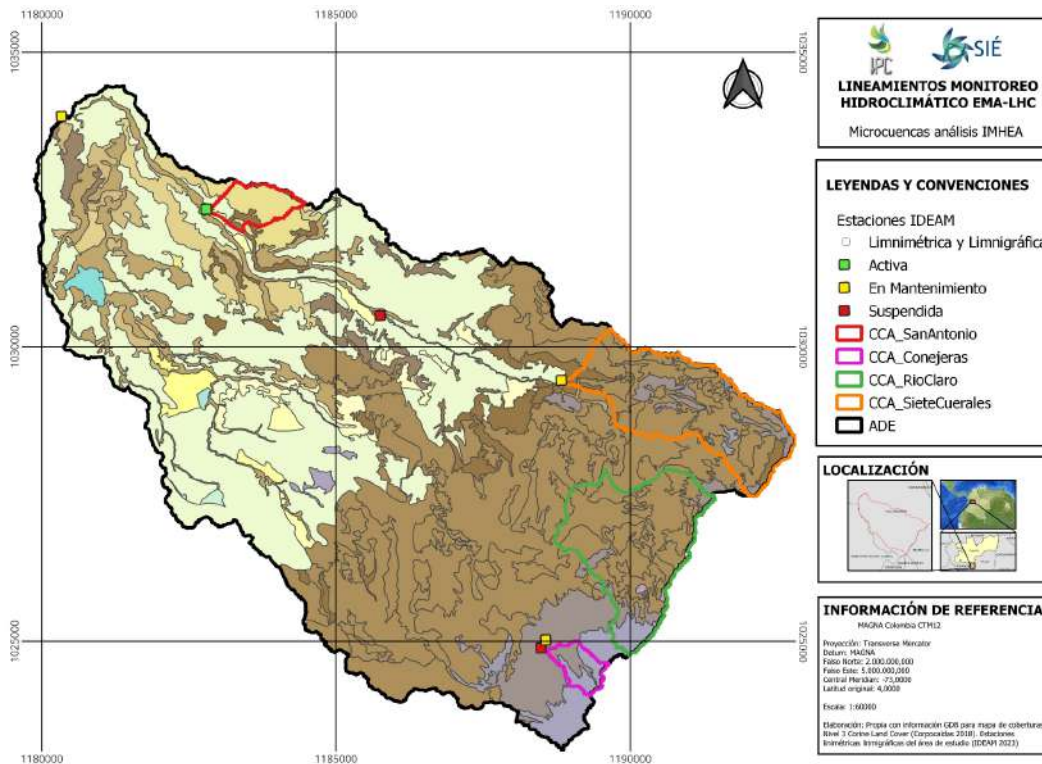


Figura 25. Microcuencas con estaciones de monitoreo en el ADE con potencial para monitoreo tipo iMHEA

Fuente: Elaboración propia.

8.3.1. Gestión de información y arreglos institucionales para uso compartido de información

Para el desarrollo del piloto de la EMA-LHC, los principales insumos provinieron de tres entidades: Corpocaldas, el IDEAM y la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, a través del Instituto de Estudios Ambientales IDEA, y del grupo de investigación GTA en Ingeniería Hidráulica y Ambiental.

Por parte de Corpocaldas se contó con el apoyo de la Subdirección de Planificación Ambiental del Territorio, quienes suministraron información cartografía del POMCA del Río Chinchiná, y acceso a los datos de monitoreo de variables de temperatura y caudales de varias estaciones, consolidadas en las plataformas regionales de información ambiental de Caldas SIMAC y CEDIAC. Con el IDEAM se obtuvieron datos de monitoreo hidroclimático desde su plataforma de descarga de datos hidrometeorológicos DHIME. Adicionalmente se contó con la colaboración de la Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental y del personal de Grupo de trabajo de Ecosistemas de Alta Montaña, quien facilitó información cartográfica y de detalle de la dinámica del glaciar Santa Isabel. Con el IDEA y el GTA en Hidráulica y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, se obtuvieron principalmente datos paramétricos e información para la implementación del modelo hidrológico Tetis en el área de estudio.

Durante el proyecto también se inició un proceso de colaboración con el observatorio Poleka Kasue y la Escuela de Ingeniería de Antioquia para el uso compartido de la información que permita el refinamiento del modelo hidrológico para el área de estudio, a través del uso de información complementaria en variables climáticas y de vegetación con sus iniciativas de monitoreo en la cuenca alta de Río Claro.

8.3.2. Modelación hidrológica

Para el desarrollo de los objetivos asociados a modelación hidrológica distribuida se utilizó el modelo Tetis descrito en la sección 4.3 que integró el módulo de nieve para la estimación de los aportes de fusión de nieve de la porción del Glaciar Santa Isabel en el área de Río Claro.

Los datos paramétricos para el modelo se obtuvieron de diferentes estudios que incluyeron: i) el proyecto “Aplicación de la modelación hidrológica distribuida de tipo conceptual en el departamento de Caldas para eventos extremos”, elaborado por IDEA y el GTA en hidráulica y Ambiental para Corpocaldas, ii) los resultados de la investigación “Estimation of glacier melting rate using distributed hydrological modeling of the Santa Isabel Volcano, Colombia” (Vélez et al., 2009), presentado por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, en el marco del evento “Meeting of the International Commission on Polar Meteorology” (MOCA 09 in Montreal), y iii) datos del artículo Hydrological study of the potential effects of the melting of Nevado del Ruiz glacier on urban growth zones in Manizales, Colombia (Marulanda Aguirre et al., 2016).

Las fuentes de información hidroclimática y de coberturas para la implementación del modelo se mencionaron en las secciones previas. Las principales limitaciones corresponden a la intermitencia de algunas de las series de datos hidroclimáticos y la ausencia de información de dinámicas de suelos que capturen las variaciones en sus parámetros hidrológicos derivados de los cambios en los usos y coberturas (solo se obtuvo un mapa de suelos que cubriera toda el área de estudio). Adicionalmente el modelo conlleva la incertidumbre asociada al desconocimiento de las entradas por precipitación horizontal, y la incidencia de acuíferos.

El modelo se calibró y validó, para la modelación de dos escenarios, el primero, con el mapa de coberturas del año 2006 y el segundo con el mapa de usos y coberturas del año 2018. En ambos casos se utilizaron las mismas series de datos climáticos, para la estimación de la oferta y la regulación hídrica. La síntesis de los resultados se presenta en la sección 8.3.6.

Cabe resaltar que la calidad de la información recopilada (salvo la estación Brisas, ubicada por fuera del área de estudio) no cumple con los parámetros mínimos de validación con datos faltantes para el periodo de análisis (2005- 2022) superiores al 15% y pruebas de calidad y homogeneidad insuficientes; sin embargo y por tratarse de un primer ejercicio de modelación hidrológica distribuida en el área de estudio, se toma la decisión de agregar los datos a escala mensual y hacer el respectivo llenado de las series de precipitación y temperatura con fines de la calibración y validación del modelo. En consecuencia, los resultados guardaran un alto grado de incertidumbre frente a los valores arrojados.

8.3.3. Estaciones de monitoreo para recuperación y mantenimiento

En el área de estudio la Tabla 23 muestra las estaciones del IDEAM inactivas o en mantenimiento. Para el caso de CONEJERAS1, la coordinación del área operativa 09 del IDEAM solicitó la suspensión teniendo en cuenta que el sitio perdió las condiciones de monitoreo hidrológico, dado que la corriente cambió su curso. adicionalmente, fue desmontado el componente automático y fue reemplazada por la estación CONEJERAS2, que cumple la misma función en la actualidad (monitoreo del Glaciar Santa Isabel del PNN Los Nevados).

| Estación | Tipología | Estado |
|--------------------------------|--------------|------------------|
| CONEJERAS2-AUT [26157170] | Limnigráfica | En mantenimiento |
| SIETECUERALES - AUT [26157200] | Limnigráfica | En Mantenimiento |
| RIO CLARO - AUT [26157190] | Limnigráfica | En Mantenimiento |
| PUENTE LA FONDA [23057701] | Limnimétrica | Suspendida |
| CONEJERAS1 - AUT [26157160] | Limnigráfica | Suspendida |

Tabla 23. Estaciones de monitoreo inactivas o en mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

8.3.4. Propuestas complementarias para iniciativas de monitoreo existentes

Para este ejercicio piloto, se plantean las siguientes propuestas de monitoreo complementarias, aprovechando los actores institucionales identificados.

Monitoreo tipo iMHEA en microcuencas San Antonio y Siete Cuerales: Siguiendo los resultados de la sección 8.3.1, las microcuencas mencionadas pueden instrumentarse para monitoreo de precipitación y evaluación de funcionamiento hidrológico de coberturas de herbazales en el primer caso y de bosque denso en el segundo caso. Para la microcuenca San Antonio, se buscaría el beneficio adicional de la conservación de las coberturas en la franja de mayor intervención antrópica del ADE. Para apoyar el monitoreo pueden vincularse a la autoridad ambiental regional y a instituciones académicas o de investigación con experiencia en monitoreo hidroclimático.

Monitoreo ecohidrológico a escala de parcelas: En este sentido el mayor potencial de profundización en variables de detalle de monitoreo se encuentra con el observatorio Poleka Kasue, con quien podría establecerse convenios mediados por la EMA, o con establecimientos del orden nacional o transandino, para la medición de variables de detalle del ciclo hidrológico asociados a la vegetación y los suelos.

Monitoreo de variables complementarias del balance hidrológico: Aprovechando la presencia del IDEAM con varias iniciativas de monitoreo, podrían implementarse la medición de variables faltantes del balance hidrológico para el área de estudio, como aguas subterráneas y precipitación horizontal. Estas iniciativas pueden apoyarse en instituciones académicas de la región que cuenta con soporte.

8.3.5. Resultados objetivos asociados a caracterización hidroclimática (O_CHC)

De la Figura 26 a la Figura 32 y en La Tabla 24, se muestran los objetivos de monitoreo asociados a caracterización hidroclimática que fue posible alcanzar con la información recopilada para el área de estudio de Río Claro. Detalles adicionales pueden consultarse en el RED Río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023).

| Tipo de Objetivo | Descripción Objetivo | Insumo |
|---|--|---|
| Contexto | Contexto climático de la región de estudio | Diagnóstico POMCA Río Chinchiná Estudio Nacional del Agua |
| Información espacial | Áreas aferentes de las estaciones hidrológicas del área de estudio | Modelo de elevación digital + ubicación estaciones de monitoreo |
| | Características fisiográficas y morfológicas del ADE | Modelo de elevación digital de terreno |
| Variables en el gradiente de elevación | Variación en el gradiente de elevación las variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura y caudal) | Diagnóstico POMCA Río Chinchiná |
| | Variación la oferta hídrica en algunos sectores del área de estudio | Datos de caudales de estaciones CDIAC e IDEAM |
| Dinámica de variables puntuales y en el gradiente de elevación. | Variación en el tiempo y en el gradiente de elevación de la temperatura ambiente | Datos meteorológicos CDIAC-e IDEAM de estaciones. |
| | Régimen de precipitación del área de estudio y su cambio en el espacio | Datos de precipitación estaciones CDIAC e IDEAM |
| | Variación en el tiempo y en el gradiente de elevación los caudales del ADE | Datos de caudales de estaciones CDIAC e IDEAM |
| Dinámica del glaciar | Contribución de agua superficial del glaciar a la oferta hídrica de la cuenca | Documentos técnicos de monitoreo a glaciares del IDEAM |
| | Variación del espesor, área y masa del glaciar | |

Tabla 24. Objetivos de monitoreo asociadas a la caracterización hidroclimática O_CHC

Fuente: Elaboración Propia

La Figura 26 y la Figura 27, muestran la espacialización de algunas variables climática para la caracterización del área de estudio, en este caso la temperatura mínima y humedad relativa.

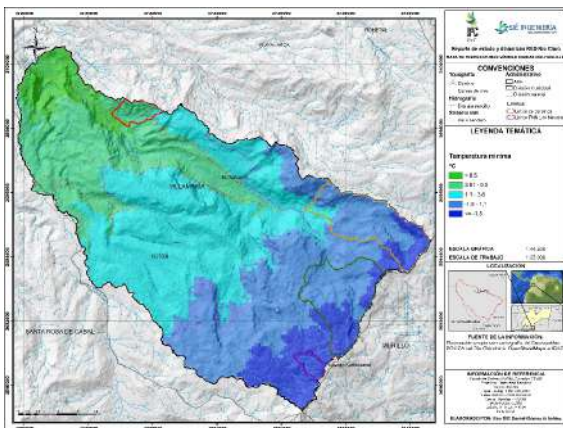


Figura 26. Mapa temperatura mínima

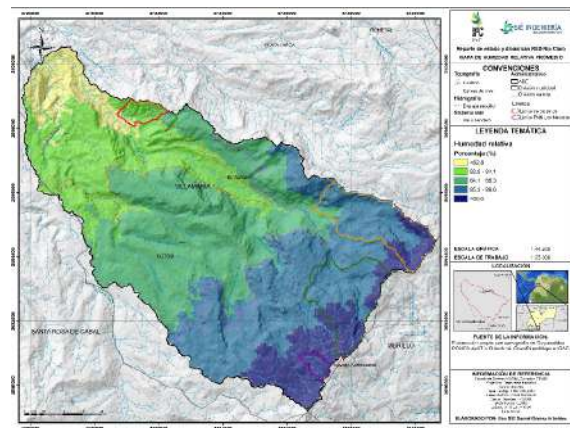


Figura 27. Mapa humedad relativa promedio

Fuente: Fuente: Geodatabase RED Rio Claro (Fundación IPC, SIÉ Ingeniería, & CONDESAN, 2023)

La Figura 28 y la Figura 29 presentan hietogramas con las series agregadas de precipitación para dos de las estaciones ubicadas en el ADE de Río Claro. La comparación de las figuras muestra una interesante

variabilidad espacial de la precipitación, con régimen unimodal en la estación Santa Isabel CDIAC, y régimen bimodal en la estación Río Claro PNN CDIAC.

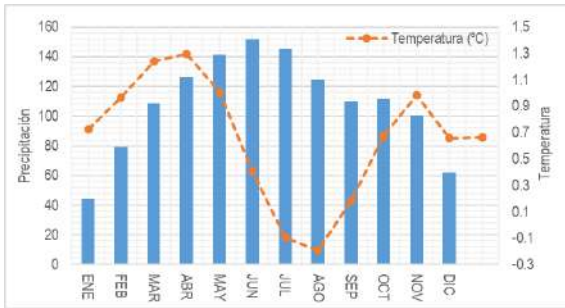


Figura 28. Régimen de precipitación mensual (mm/mes) estación Santa Isabel CDIAC (4812 msnm)

Fuente: POMCA Río Chinchiná (UNAL & Corpocaldas, 2014) citado en RED Río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023)

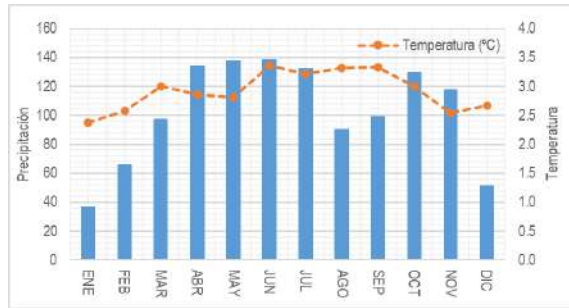


Figura 29. Régimen de precipitación mensual (mm/mes) estación Río Claro PNN CDIAC (4178 msnm)

La Figura 30 y la Figura 31 presentan el análisis de caudales en una estación de monitoreo ubicada en la franja de bosque altoandino del área de estudio. La línea de tendencia de primer orden señala una reducción en los caudales.

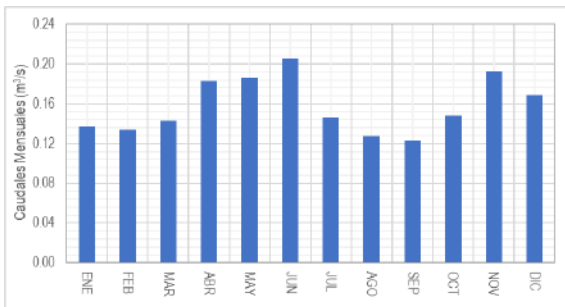


Figura 30. Régimen de caudales con registros de la estación SAN ANTONIO [26157210]

Fuente: RED Río Claro (SIÉ Ingeniería et al., 2023) con información estaciones IDEAM

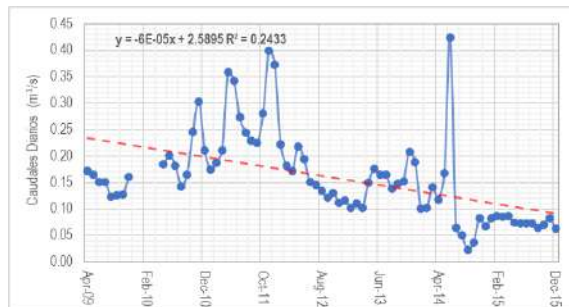


Figura 31. Caudales diarios multianuales en la estación SAN ANTONIO [26157210]

Para el caso del glaciar Santa Isabel, la Figura 32 presenta la dinámica de pérdida de áreas y de espesor a lo entre el año 2014 y 2019

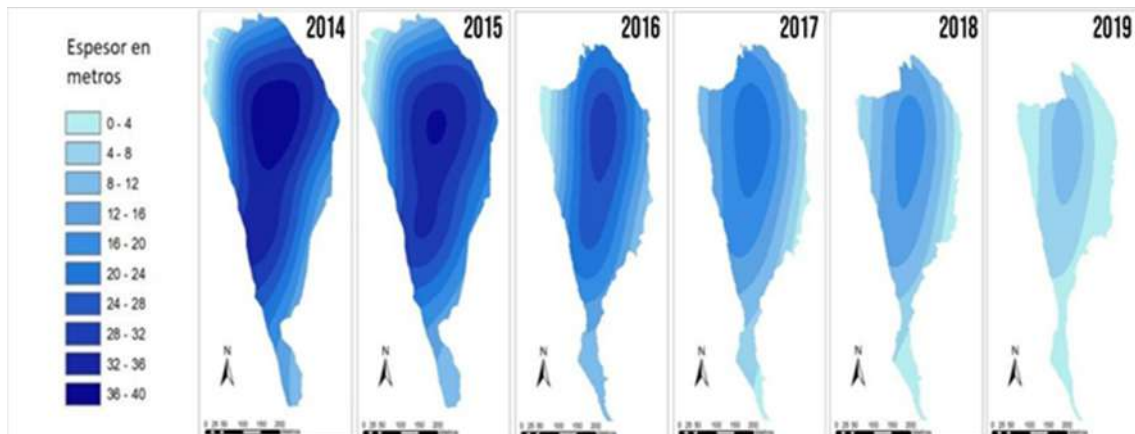


Figura 32. Extensión y espesor del Glaciar años 2014 al 2019

Fuente: Informe técnico estado glaciar Santa Isabel (MINAMBIENTE & IDEAM, 2020b)

8.3.6. Resultados objetivos asociados modelación hidrológica de impacto de cambios en coberturas (O_MHICob).

La Figura 33 y la Figura 34, muestran la espacialización del interflujo, uno de los flujos intermedios dentro del balance hidrológico para condiciones secas y húmedas respectivamente, utilizando el mapa de coberturas del año 2018. La comparación de las figuras muestra una reducción importante del interflujo en periodos secos, indicador de estrés hídrico en la zona.

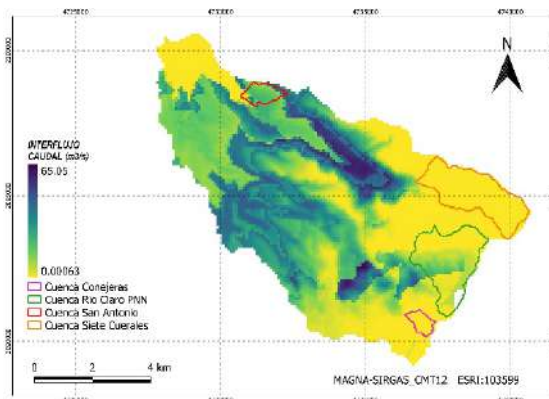


Figura 33. Interflujo condiciones secas

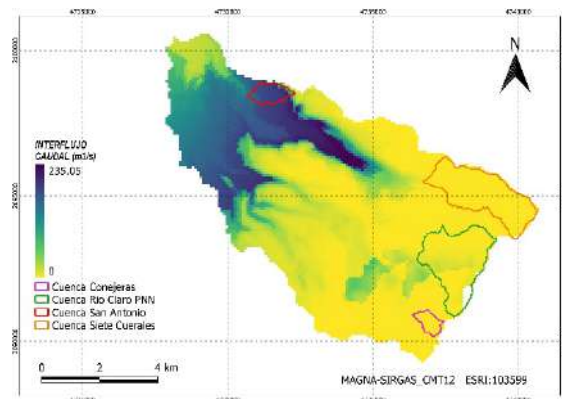


Figura 34. Interflujo condiciones húmedas

Fuente: SIÉ Ingeniería

Los caudales simulados se utilizaron para obtener la curva de duración de caudales en los dos escenarios de modelación (Figura 35). La curva del escenario 2006 muestra una persistencia del 80% de una oferta hídrica de la cuenca de entre 2.85 y 3.50 m³/s mientras que el escenario 2018 disminuye pasando a caudales de entre 2.30 y 2.95 m³/s.

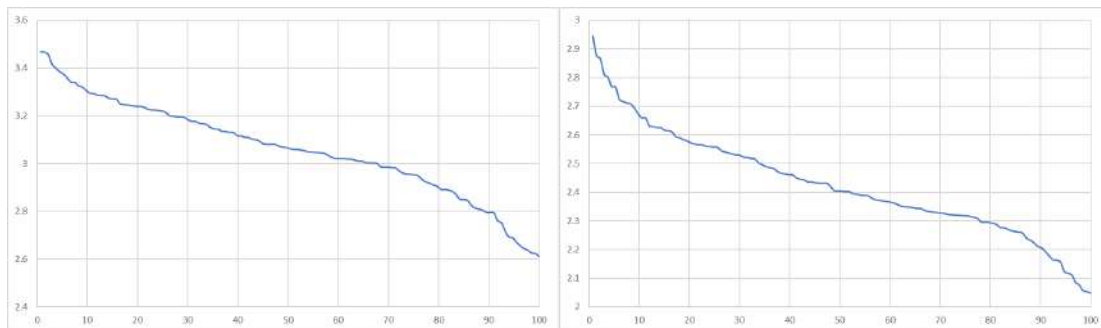


Figura 35. Comparación de curvas de duración de caudales condiciones de coberturas 2006 y 2018

Fuente: SIÉ Ingeniería

La comparación de los hidrogramas obtenidos durante la simulación del modelo se presentan en la Figura 36, para los dos escenarios de modelación (coberturas 2006 y 2018), evidenciando consistencia en el proceso lluvia escorrenría, con caudal alto en épocas de lluvias y periodos de estiaje ante la ausencia de la misma en la cuenca de estudio.

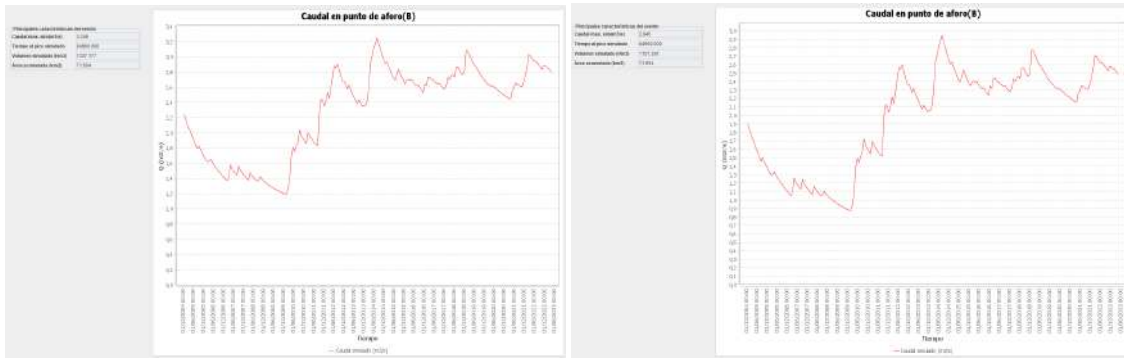


Figura 36. Comparación de hidrogramas de caudales simulados con el modelo TETIS. (2005-2023)

Fuente: SIÉ Ingeniería

Al simular los caudales mensuales en el periodo 2005 – 2023 se encontró una disminución de aproximadamente 663 l/s en el caudal medio ofertado por la cuenca al cambiar las coberturas del suelo con las mismas condiciones hidrológicas debido a la pérdida de regulación hídrica por el cambio de almacenamiento en los tanques.

La Figura 37 muestra la comparación de las gráficas de los flujos internos y externos donde se aprecia como el cambio de coberturas en el suelo de la cuenca de Río Claro afecta principalmente el flujo base con una disminución del caudal de salida de esta componente que explica la disminución en la oferta hídrica superficial total por la pérdida de regulación hídrica bajo las coberturas de suelo del año 2018.

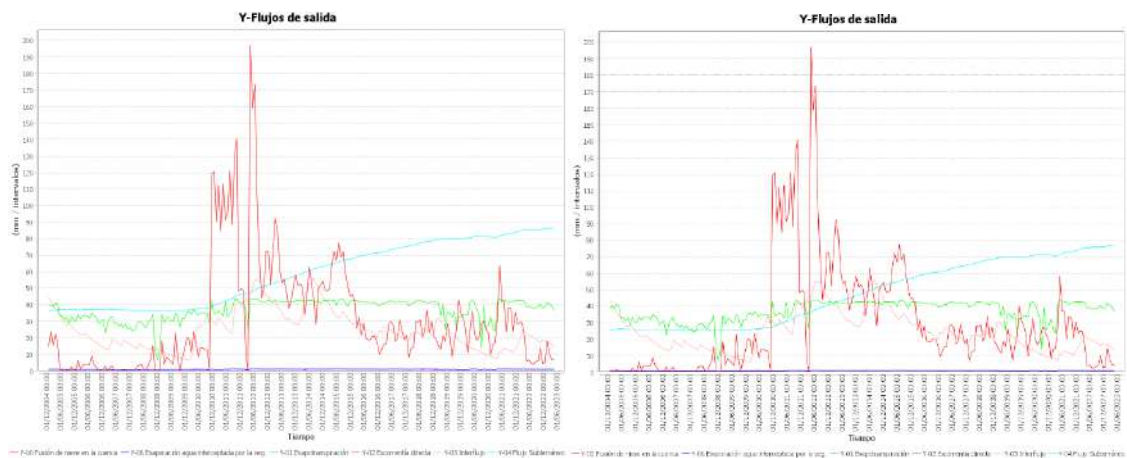


Figura 37. Flujos Internos en la calibración del modelo TETIS condiciones de coberturas 2006 y 2018

Fuente: SIÉ Ingeniería

A partir de la curva de duración de caudales se calcularon el índice de regulación hídrica (IRH) y la oferta hídrica superficial total, siguiendo metodologías del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010a) para ambos escenarios de modelación. La Tabla 25 presenta los resultados obtenidos, que incluyen la diferencia entre las dos coberturas evaluadas bajo las mismas condiciones hidrometeorológicas.

| Período | Caudal (m ³ /s) | IRH |
|--------------|----------------------------|-------|
| Período 2006 | 3.07 | 0.994 |
| Período 2018 | 2.40 | 0.985 |
| Diferencia | 0.66 | 0.010 |

Tabla 25. Caudal promedio e índice de regulación hídrica para diferentes escenarios de coberturas

Fuente: Elaboración propia

Los indicadores estimados con el modelo, evidencian una cuenca de buena regulación hídrica, con altos excedentes de agua que se conservan pese al cambio de coberturas y la disminución de la oferta hídrica total. Dado que el IRH se mide con una relación de los caudales bajo la curva de duración y el caudal medio, la proporción que se conserva en ambos escenarios de modelación y no muestra el impacto total sobre la regulación hídrica en la cuenca de estudio.

8.3.7.Perspectivas

Los siguientes pasos para avanzar en el monitoreo hidroclimático en río Claro, se mencionaron a lo largo de la sección y se sintetizan a continuación:

- Avances con el Observatorio Poleka Kasue, para refinamiento del modelo hidrológico Tetis en el área de estudio con datos más específicos asociados a características hidrológicas de vegetación, y estimación de cambio en parámetros hidrológicos de suelos.
- Actualización de mapas de coberturas
- Recuperación de estaciones de monitoreo, para mejorar la continuidad y calidad de la información capturada.
- Implementación de iniciativas tipo iMHEA en el área de estudio
- Monitoreo de variables adicionales del balance hidrológico como precipitación horizontal y aguas subterráneas

9. RECOMENDACIONES FINALES



Finamente se señalan las siguientes direcciones para el avance del monitoreo hidroclimático en alta montaña, que incluye por una parte aspectos identificados en otras fuentes de información y por otro lado los aspectos evidenciados en el desarrollo de la EMA LHC

- Medición de la precipitación horizontal y las aguas subterráneas, para lo que pueden involucrarse iniciativas institucionales como la de monitoreo isotópico y de aguas subterráneas del IDEAM, a través de la ubicación de puntos de monitoreo en regiones de alta montaña con alta incidencia de acuíferos como en la Cordillera Oriental.
- Para el caso particular de precipitación horizontal además de instalar nuevos puntos de monitoreo, es necesario continuar avanzando en el conocimiento de estrategias y herramientas de medición que hagan más simple la labor, y confieran mayor representatividad a la medida, es decir que el dato realmente exprese la entrada de agua al balance hídrico, distinguiéndola del almacenamiento en la vegetación, que vuelve a la atmósfera por evaporación. Para impulsar esta área de profundización se recomienda al IDEAM, la inclusión de la variable en futuras versiones de protocolos de monitoreo de agua, y en programas de monitoreo en alta montaña.
- Mejorar la calidad de la información hidroclimática capturada en ecosistemas de alta montaña, en particular la continuidad de las series de datos
- Avanzar en la recuperación de estaciones de monitoreo del IDEAM en ecosistemas de alta montaña
- Emplazamiento de nuevas estaciones de monitoreo hidroclimático en áreas con características diferenciales poco monitoreadas (necesario por la diversidad de condiciones hidroclimáticas en la alta montaña), particularmente en la variable de caudales, que cuenta con baja cobertura a nivel nacional.
- Generación periódica de mapas de coberturas en alta montaña a escala 1:25000 o menor, para identificar sus dinámicas de cambio.
- Adaptación de los mapas de coberturas a los tipos de vegetación específicos de alta montaña, y/o investigación de alternativas a la metodología Corine Land Cover, que se ajusten mejor a los tipos de vegetación de paramo, como fuente de información de coberturas para modelación hidrológica.
- Generación periódica de mapas de suelos en alta montaña a escala 1:25000 para identificar sus dinámicas de cambio en relación a los cambios de coberturas.
- Implementación de iniciativas de monitoreo IMHEA con participación de instituciones académicas en las regiones.
- Implementación de ejercicios en paisajes de monitoreo que permitan la integración de comunidades y el desarrollo de programas de conservación, restauración y reconversión con enfoque simultáneo a la protección del recurso hídrico
- Diseñar estrategias de formación con enfoque diferencial para el monitoreo ecohidrológico participativo a escala de parcelas.

- Aumentar las variables monitoreadas en los glaciares de la Sierra Nevada,
- Incentivar la modelación hidrológica distribuida en alta montaña, para aumentar el conocimiento de las variables del ciclo hidrológico en estos ecosistemas, y para brindar información de los beneficios de la conservación y restauración de estos ecosistemas en términos de la oferta hídrica y la regulación hídrica, que pueda integrarse al cálculo de los incentivos de esquemas de pago por servicios ambientales.



ANEXO 1

ESTACIONES DE MONITOREO IDEAM EN REGIONES DE ALTA MONTAÑA Y COMPLEJOS DE PÁRAMO ASOCIADOS

La Tabla 26 contiene el listado de estaciones de monitoreo IDEAM en regiones de alta montaña, los complejos de páramo asociados o cercanos, y el estado de la respectiva estación. Los casos con estaciones activas tienen el mayor potencial para el monitoreo hidrológico con objetivos de modelación hidrológica. Las áreas con estaciones en mantenimiento y suspendidas también se identifican, para que el IDEAM estudie su intervención prioritaria, por la importancia que representan los ecosistemas de alta montaña para la conservación del recurso hídrico del país.

| Nombre estación | Altitud | Estado | Complejo |
|--|---------|--------|-------------------------------|
| ANIMAS LAS [35027150] | 2840 | Activa | Cruz Verde - Sumapaz |
| LLANO LARGO | 2980 | Activa | Cruz Verde - Sumapaz |
| PAPAS [44017060] | 2745 | Activa | Doña Juana - Chimayoy |
| RIOGRANDE - CAUCA [44017050] | 2760 | Activa | Doña Juana - Chimayoy |
| LOMITAS [26017070] | 2991 | Activa | Guanacas - Puracé - Coconucos |
| MALVASA [26027240] | 2977 | Activa | Guanacas - Puracé - Coconucos |
| PALETARA [26017080] | 2991 | Activa | Guanacas - Puracé - Coconucos |
| SAN JUAN [21057120] | 3450 | Activa | Guanacas - Puracé - Coconucos |
| BOCATOMA CENTENARIO [52047030] | 2740 | Activa | La Cocha - Patascoy |
| CARLOSAMA [52057040] | 2920 | Activa | La Cocha - Patascoy |
| LA COCHA [47017020] | 2850 | Activa | La Cocha - Patascoy |
| SINDAMANOY [47017580] | 2820 | Activa | La Cocha - Patascoy |
| CATARATAS 2 [23017080] | 4356 | Activa | Los Nevados |
| LAGUNA DEL OTUN [26137240] | 3957 | Activa | Los Nevados |
| SAN FRANCISCO [24037580] | 2700 | Activa | Los Nevados |
| SAN JOSE [35077100] | 2950 | Activa | Rabanal y río Bogotá |
| GUICAN [24037040] | 2827 | Activa | Sierra Nevada del Cocuy |
| LA PLAYA, CARDENILLO [24037001] | 3742 | Activa | Sierra Nevada del Cocuy |
| PUENTE VDA. CALVARIO [24037620] | 3106 | Activa | Sierra Nevada del Cocuy |
| RITACUBA NEGRO - [24037630] | 4307 | Activa | Sierra Nevada del Cocuy |
| COPA LA [24037020] | 2700 | Activa | Tota - Bijagual - Mamapacha |
| CORPOBOYACA - SANTA INES -AUT [35167000] | 3041 | Activa | Tota - Bijagual - Mamapacha |
| CRIADERO -AUT [35167020] | 3025 | Activa | Tota - Bijagual - Mamapacha |
| HATO LAGUNA - AUT [35167010] | 3020 | Activa | Tota - Bijagual - Mamapacha |

| Nombre estación | Altitud | Estado | Complejo |
|---------------------------------------|---------|---------------|-------------------------------------|
| PUENTE LAS CANAS [35197070] | 3135 | Activa | Tota - Bijagual - Mamapacha |
| PUENTE SATOBA [2403700232] | 2827 | Activa | Tota - Bijagual - Mamapacha |
| SAN ANTONIO [26157210] | 3048 | Activa | Tota - Bijagual - Mamapacha |
| SIACHOQUE [24037550] | 2720 | Activa | Tota - Bijagual - Mamapacha |
| VEGAS LAS [24037100] | 2700 | Activa | |
| PIEDRAS DE COBRE - AUT [22057010] | 3452 | Mantenimiento | Chilí - Barragán |
| CALOSTROS BAJO - AUT [35027510] | 2943 | Mantenimiento | Chingaza |
| QUEBRADA RINCON - AUT [35027500] | 2943 | Mantenimiento | Chingaza |
| SIETECUERALES - AUT [26157200] | 3794 | Mantenimiento | Los Nevados |
| PUENTE SAN FRANCISCO - AUT [21257070] | 2875 | Mantenimiento | Los Nevados |
| CONEJERAS2 - AUT [26157170] | 4686 | Mantenimiento | Los Nevados |
| RIO CLARO - AUT [26157190] | 2706 | Mantenimiento | Los Nevados |
| PUENTE ARAGON - AUT [26017060] | 2993 | Mantenimiento | Sotará |
| VADO HONDO - AUT [35197020] | 2831 | Mantenimiento | Tota - Bijagual - Mamapacha |
| PUENTE PESCADERO [24037350] | 2860 | Suspendida | Almorzadero |
| BOCATOMA EAAB - AUT [35027520] | 3077 | Suspendida | Chingaza |
| VALENCIA [44017040] | 2900 | Suspendida | Doña Juana - Chimayoy |
| LOMA REDONDA [21057010] | 3300 | Suspendida | Guanacas - Puracé - Coconucos |
| SAN RAFAEL-LAGUNA [21057020] | 3300 | Suspendida | Guanacas - Puracé - Coconucos |
| VEGAS LAS [24017790] | 2980 | Suspendida | Iguaque - Merchán |
| BERLIN [37017010] | 3330 | Suspendida | Jurisdicciones - Santurbán - Berlín |
| GAMARRA [23217020] | 3985 | Suspendida | Jurisdicciones - Santurbán - Berlín |
| PUENTE TRUTE [37017020] | 3228 | Suspendida | Jurisdicciones - Santurbán - Berlín |
| BOCATOMA TRIANGULO [22057090] | 4266 | Suspendida | Las hermosas |
| CONEJERAS1 - AUT [26157160] | 4685 | Suspendida | Los Nevados |
| PUENTE LA FONDA [23057701] | 3469 | Suspendida | Los Nevados |
| AMARILLO EL [24017670] | 3100 | Suspendida | Rabanal y río Bogotá |
| CANAL PATAGUY [24017720] | 3200 | Suspendida | Rabanal y río Bogotá |
| CANAL RUCHICAL BOC [24017660] | 3200 | Suspendida | Rabanal y río Bogotá |
| GACHANECA [24017630] | 3300 | Suspendida | Rabanal y río Bogotá |
| PUENTE EL [24017700] | 3200 | Suspendida | Rabanal y río Bogotá |
| REBOSADERO [24017680] | 3300 | Suspendida | Rabanal y río Bogotá |
| SALIDA EMBALSE [24017690] | 3300 | Suspendida | Rabanal y río Bogotá |
| CHORRERA LA [24037590] | 2700 | Suspendida | Tota - Bijagual - Mamapacha |

Tabla 26. Complejos con estaciones limnigráficas o limnimétricas del IDEAM cercanas o asociadas a complejos de páramo

Fuente: Elaboración propia

REFERENCIAS

- Armero, M., & Galvis, M. (2021). *Caminos para la restauración ecológica en territorios indígenas en páramo* (p. 48). Instituto Humboldt.
- Beven, K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. In *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer* (Vol. 15). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119951001>
- Burman, R. D., & Pochop, L. O. (1994). *Evaporation, evapotranspiration and climatic data*. Amsterdam ; New York : Elsevier. <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:000348254>
- Buytaert, W. (2004). *The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., & Iñiguez, V. (2006). *Hidrología del páramo Importancia, propiedades y vulnerabilidad. Conocer para Conservar* (p. 16).
- Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2006). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73, 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The Effect of Land-Use Changes on the Hydrological Behavior of Histic Andosols in South Ecuador. *Hydrological Processes*, 19, 3985–3997. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Calderon, D., & Lemus, L. (2016). *GUIA METODOLOGICA PARA EL PREPROCESAMIENTO DE DATOS Y LA EJECUCIÓN DEL MODELO HIDROLOGICO TETIS*. Universidad Santo Tomás.
- CARDER, Corpocaldas, Cortolima, CRQ, & Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2023). *Acuerdo 004: Por medio del cual se adopta el Plan de Manejo del Complejo de Páramos Los Nevados*" (p. 291).
- Ceballos, J. L. (2012). *Glaciares de Colombia más que montañas con hielo*. IDEAM.
- Céleri, R., De Bièvre, B., & Ochoa, B. (2012). *Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas Andinos: Iniciativa iMHEA* (p. 17). Iniciativa MHEA; CONDESAN.
- Cortés, J., & Sarimiento, C. (2013). *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana. Memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos* (p. 240). Instituto Humboldt.
- Cubas, D. (2010). *Mapeo de actores sociales. In Organización de los Estados Americanos* (p. 46). [https://www.oas.org/es/cim/docs/MapeoHON\[Final\].pdf](https://www.oas.org/es/cim/docs/MapeoHON[Final].pdf)
- Cusgüen, L., Sarmiento, C., Benavides, J. C., Martínez, V., Alarcón, P., & Acero, N. (2021). *Propuesta de monitoreo de la adaptación al cambio climático en la alta montaña*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Conservación Internacional.
- Enrique Javier Peña Orlando Zúñiga, A. M. T. (2013). *Monitoreo del ciclo del carbono en Ecosistemas de alta montaña del neotrópico* (1.ª ed.). Programa Editorial Universidad del Valle. <https://programaeditorial.univalle.edu.co/gpd-monitoreo-del-ciclo-del-carbono-en-ecosistemas-de-alta-montana-del-neotropico-metodos-y-estudios-de-caso-9789587650808-63325302eec9b.html>
- Evans, K., Marchena, R., Flores, S., Pikitle, A., & Larson, A. M. (2016). *Guía práctica para el monitoreo participativo de gobernanza*. CIFOR.
- Fundación IPC, SIÉ Ingeniería, & CONDESAN. (2023). *Base de datos geográfica (GDB) RED Rio Claro*. CONDESAN.
- Fundación IPC, SIÉ Ingeniería, CONDESAN, & Instituto Humboldt. (2023). *Memorias conversatorio sobre monitoréo hidroclimático integrado en la alta montaña* (p. 16). CONDESAN.
- Fundación Natura. (2020). *Lineamientos metodológicos del monitoreo comunitario intercultural* (p. 106). Fundación Natura.
- García, M. (2018). *Protocolo de Monitoreo Hidrológico en Páramos*. Instituto Humboldt.
- GIMHA. (2021). *DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA TETIS v.9* (p. 97). Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida.
- Hernández, A. M., Ayazo, R. A., González, R., Guevara, A., Hernández, O., Alcázar, C., & Becerra, M. (2021).

- Programa de capacitación en monitoreo participativo dirigido a comunidades locales diseñado y puesto en marcha.* Instituto Humboldt.
- Hernández, J., Hurtado, A., Ortiz, R., & Walschburger, T. (1992). Unidades biogeográficas de Colombia. In G. Halffter (Ed.), *LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA DE IBEROAMÉRICA I* (pp. 43–50). PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO.
- Herrera, Y. (2020). *Sistema de monitoreo para la rehabilitación con enfoque participativo. Informe final. Contrato No. 19-206* (p. 91). Instituto Humboldt.
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., & Vásquez, A. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo.* UICN.
- Hofstede, R. G. M. (1995). Effects of livestock farming and recommendations for management and conservation of páramo grasslands (Colombia). *Land Degradation & Development*, 6(3), 133–147. <https://doi.org/10.1002/ldr.3400060302>
- Holguín, L., & Cusguen, L. (2021). *Red de monitoreo comunitario del clima. Guía para su implementación (Alta montaña)* (p. 43). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Conservación Internacional.
- IDEAM. (2019). *GUÍA METODOLÓGICA DE LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA VARIABLES METEOROLÓGICA* (p. 104).
- IDEAM. (n.d.). *Protocolos, Procedimientos y metodologías.* <http://www.ideam.gov.co/web/agua/protocolos-procedimientos-y-metodologias#>
- IDEAM. (2002). Transformación y cambio en el uso del suelo en los páramos de Colombia en las últimas décadas. In C. Castaño Uribe (Ed.), *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor* (p. 109). IDEAM.
- IDEAM. (2010a). *Estudio Nacional del Agua.*
- IDEAM. (2010b). La Montaña Alta (MA). In A. Flórez (Ed.), *Sistemas Morfogénicos del Territorio Colombiano* (pp. 29–50). IDEAM.
- IDEAM. (2010c). *LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA. METODOLOGIA CORINE LAND COVER ADAPTADA PARA COLOMBIA. ESCALA 1:100.000.*
- IDEAM. (2019). *Informe del estado de los glaciares colombianos 2019* (p. 28). IDEAM.
- IDEAM. (2021). *GUÍA PARA EL EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS* (p. 32). IDEAM.
- 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* (p. 224). IDEAM.
- IDEAM, IAvH, & CONDESAN. (2018). *Propuesta: Estrategia para Monitoreo Integrado de los Ecosistemas de Alta Montaña de Colombia.*
- IDEAM, & INVERMAR. (2021). *Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua* (p. 631). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC. (2015). *Nota web: "IGAC culminó estudio de suelos en los páramos colombianos."* <https://www.igac.gov.co/es/noticias/igac-culmino-estudio-de-suelos-en-los-paramos-colombianos>
- IGAC. (2021). *IGAC entrega estudio de seis complejos de páramos a la CAR Cundinamarca.* IGAC entrega estudio de seis complejos de páramos a la CAR Cundinamarca
- iMHEA. (n.d.). *Iniciativa Regional de Monitoreo hidrológico de Ecosistemas Andinos.* <https://imhea.org/monitoreo/sitios-de-monitoreo-imhea/boyaca-2/>
- Instituto Humboldt. (2014). *Coberturas de la tierra en los páramos priorizados en el Proyecto Fondo Adaptación a escala 1:25.000 (metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia).* (p. 168).
- Llambí, L. (2015). ESTRUCTURA, DIVERSIDAD Y DINÁMICA DE LA VEGETACIÓN EN EL ECOTONO BOSQUE-PÁRAMO: REVISIÓN DE LA EVIDENCIA EN LA CORDILLERA DE MÉRIDA. *Acta Biologica Colombiana*, 20, 5–20. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n3.46721>
- 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.
- Llambí, L. D., Soto, A., Céleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, Hidrología y Suelos de Páramos.*
- MADS. (2018). *Ley 1930: "POR MEDIO DE LA CUAL SE DICTAN DISPOSICIONES PARA LA GESTIÓN*

- INTEGRAL DE LOS PÁRAMOS EN COLOMBIA.* MADS.
- MADS. (2021). *Programa Nacional de Pago por Servicios Ambientales PSA*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Marulanda Aguirre, A., Fonseca Tobasura, O. A., Vélez Upegui, J. J., & Arboleda, O. D. C. (2016). Hydrological study of the potential effects of the melting of Nevado del Ruiz glacier on urban growth zones in Manizales, Colombia. *Hydrological Sciences Journal*, 61(12), 2179–2192. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1090574>
- MAVDT, & Instituto Humboldt. (2010). *DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA LA DELIMITACIÓN DE PÁRAMOS DEL PAIS Y DE LINEAMIENTOS PARA SU CONSERVACIÓN* (p. 91). Minsiterio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodriguez, N., Franco, C., Betancourt, J. C., Olaya, E., Posada, E., & Cardenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia* (p. 208). Instituto Humboldt.
- Ochoa, B., Cuadros, J., Arapa, E., Aste, N., Ochoa, E., & Bonnesoeur, V. (2022). *Guía de modelación hidrológica Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica para la infraestructura natural* (p. 148). CONDESAN.
- OMM. (2021). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Volumen I – Medición de variables meteorológicas* (p. 642). Organización Meteorológica Mundial.
- Pearce, A. J., Gash, J. H. C., & Stewart, J. B. (1980). Rainfall interception in a forest stand estimated from grassland meteorological data. *Journal of Hydrology*, 46(1–2), 147–163. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(80\)90040-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(80)90040-2)
- Poulenard, J. (2000). *LES SOLS DES PÁRAMOS D'ÉQUATEUR SUR COUVERTURE PYROCLASTIQUE DIVERSITÉ, GENÈSE ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES*. Université Henri-Poincaré.
- Rangel, O., & Sturm, H. (1995). *Consideraciones sobre la vegetación, la productividad primaria neta y la artropofauna asociada en regiones paramunas de la cordillera Orienta*.
- Rangel, Orlando, Linares Castillo, E. L., Betancur, J., Jaime, U., Teresa, M. P. M., Andrés, A., Marcela, C., Jaime, A. C., Cristina, D. A., Jaime, Á., Luis, F. J., Gonzalo, A. C. M., Antonio, F., Cristina, A. R. M., Emil, H., Liliana, A. C., Alberto, C., Dimas, M. C., Gladys, C., ... Jaime, U. (2000). *Colombia diversidad biótica III : La región de vida paramuna*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80775>
- Ribes, J., Keesman, K., & Spanjers, H. (2004). Modelling anaerobic biomass growth kinetics with a substrate threshold concentration. *Water Research*, 38(20), 4502–4510. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.08.017>
- Rivera, D., & Rodríguez, C. (2011). *GUÍA DIVULGATIVA DE CRITERIOS PARA LA DELIMITACIÓN DE PÁRAMOS DE COLOMBIA* (p. 68). Instituto Humboldt.
- Rodríguez-Morales, M., Acevedo-Novoa, D., Machado, D., Ablan, M., Dugarte, W., & Dávila, F. (2019). Ecohydrology of the Venezuelan páramo: water balance of a high Andean watershed. *Plant Ecology & Diversity*, 12(6), 573–591. <https://doi.org/10.1080/17550874.2019.1673494>
- Sarmiento, C., Cadena, C., Zapata, J., & Leon, O. (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia: actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000*. Instituto Humboldt.
- Sarmiento, C., Osejo, A., Ungar, P., & Zapata, J. (2017). Páramos habitados: desafíos para la gobernanza ambiental de la alta montaña en Colombia. *Biodiversidad En La Práctica*, 2(1), 122–145.
- Sarmiento, L. (2009). Water Balance and Soil Loss Under Long Fallow Agriculture in the Venezuelan Andes. *Mountain Research and Development*, 20, 246–253. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2009\)020\[0246:WBASLU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2009)020[0246:WBASLU]2.0.CO;2)
- SIAC. (n.d.). *Unidades hidrográficas para aguas subterráneas*. http://cifras.siac.gov.co/Portal-SIAC-web/faces/agua_inicio.xhtml
- SIÉ Ingeniería, Fundación Instituto de Pensamiento Complejo, CONDESAN, IDEAM, & Instituto Humboldt. (2023). *REPORTE DE ESTADO Y DINÁMICA DE LOS SISTEMAS ECOLÓGICOS Y SOCIALES DE LA CUENCA DEL RÍO CLARO*. CONDESAN.
- Singh, V. P., & Frevert, D. . (2006). Watershed Models. *Experimental Agriculture*, 42, 370. <https://doi.org/10.1017/S0014479706293797>
- Smith, J., Cartaya, V., Llambí, L., & Toro, J. (2014). *Análisis participativo del uso de la tierra y la calidad de vida en dos páramos de Venezuela: importancia para el diseño de estrategias de conservación* (pp.



- 399–420).
- Tobón, C. (2022). *Los páramos de Colombia Características biofísicas, ecohidrología y cambio climático*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Vélez, J. J., Botero, B., & Duque, E. (2009). *Estimation of glacier melting rate using distributed hydrological modeling of the Santa Isabel Volcano, Colombia*. Meeting of the International Commission on Polar Meteorology MOCA 09 in Montreal.
- Wanielista, M. P., Kersten, R., & Ealgin, R. (1997). *Hydrology : water quantity and quality control*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com/books/about/Hydrology.html?hl=es&id=mxsfAQAAIAAJ>
- Yepes, A., Arango, C. F., Cabrera, E., González, J. J., Galindo, G., Barbosa, A. P., Urrego, D., Tobón, P., Suárez, A., & Camacho, A. (2018). *Propuesta de Lineamientos para el Monitoreo Comunitario Participativo En Colombia y su Articulación con el Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques*. FAO.

ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO

Jorge Adrián Castaño
Coordinación EMA-LHC
Fundación Instituto de Pensamiento Complejo

Víctor Mauricio Aristizábal
Modelación Hidrológica
SIÉ Ingeniería

Luis Daniel Llambí
Coordinador. Adaptación en las Alturas-Andes.
CONDESAN

Jorge Julián Vélez
Modelación Hidrológica
Universidad Nacional de Colombia
GTA Hidráulica y Ambiental

REVISION Y DIAGRAMACIÓN

Alejandra Melfo, Saskia Flores, Rafael Rodríguez
CONDESAN

CITAR COMO

Castaño, J.A., Aristizabal, V.M., Llambí, L.D., Vélez, J.J., 2024. Lineamientos de Monitoreo Hidroclimático a Escala de Paisajes en Socioecosistemas de Alta Montaña en Colombia. EMA-Colombia. Programa Adaptación en las Alturas – Andes. CONDESAN-COSUDE.

ISBN: 978-9942-809-09-4

