

Diseño de estrategias para el monitoreo participativo de variables hidroclimáticas orientadas a la comprensión de los servicios hidrológicos en la cuenca del río Tona.

Anggie Paola Giraldo Ávila

Lizeth Camila Lara Cárdenas

Lina Marcela Ramírez Neira

Trabajo de Grado para optar el Título de Ingeniería Civil

Directora

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD in Agriculture, Food and Rural Development - emphasis in Water management

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Doctor en Ingeniería, énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico-Mecánica

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

El presente trabajo tiene una dedicatoria especial. En primer lugar, a Dios, ya que, gracias a sus bendiciones, salud y sabiduría, hemos llegado a esta instancia tan importante y decisiva para nuestro futuro profesional.

En segundo lugar, deseamos expresar nuestro más profundo y sincero agradecimiento a nuestros padres, quienes han sido un pilar fundamental en cada etapa de nuestras vidas. De manera particular, reconocemos el apoyo incondicional, la motivación constante, la guía certera y, sobre todo, las palabras de aliento que nos han brindado a lo largo de los años, recordándonos siempre la importancia de seguir adelante y confiar en nosotras mismas. Ellos son:

- Balabran Giraldo y Arelys Ávila, padres de Anggie Paola Giraldo Ávila;
- Carlos Lara y Liceth Cárdenas, padres de Lizeth Camila Lara Cárdenas;
- Javier Ramírez y Lina Neira, padres de Lina Marcela Ramírez Neira.

A todos ellos, sin duda alguna, les debemos no solo la culminación de este pregrado, sino también nuestro crecimiento personal y el fortalecimiento de nuestros valores en cada etapa educativa y vital que hemos cursado. Su ejemplo, entrega y sacrificio han estado presentes en cada paso y en cada decisión que hemos tomado; gracias a ellos, hemos encontrado la resiliencia, la perseverancia y la responsabilidad para enfrentar cualquier adversidad, y la determinación para seguir luchando por cada uno de nuestros sueños. Esos sueños, sin lugar a duda, también les pertenecen, porque han sido nuestra principal motivación para intentarlo una vez más y no desfallecer.

Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a nuestros demás familiares, quienes nos han acompañado en todo este proceso y han sido testigos de cada esfuerzo, logro y meta alcanzada. Del mismo modo, agradecemos a nuestros amigos, pues su compañía y escucha han sido un soporte invaluable en los momentos de incertidumbre, y su amistad ha hecho más ameno este camino.

De igual manera, agradecemos profundamente a nuestras compañeras de trabajo, pues han sido el equipo ideal para desarrollar este proyecto. Desde el primer día, encontramos un equilibrio perfecto para el diseño y la construcción de esta investigación; en ella, no solo adquirimos nuevos conocimientos, sino que también recibimos valiosas enseñanzas, lo que nos permitió, gracias a las distintas cualidades y habilidades de cada una, complementarnos y responder de manera acertada a cada interrogante, reto y situación que se nos presentó.

Finalmente, este trabajo de grado no solo refleja el empeño, la disciplina y la constancia de cada una de nosotras, sino también el cariño, la fe y el respaldo de todas aquellas personas que han confiado en nosotras durante este recorrido. A cada una de ellas, infinitas gracias por ser parte esencial de esta experiencia y por enseñarnos que, con unidad, esfuerzo y dedicación, las metas se cumplen y los sueños se materializan. Este logro es nuestro y de quienes nos han acompañado.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por brindarnos una formación académica de excelencia y por proporcionarnos los conocimientos, recursos y espacios necesarios para el desarrollo de este trabajo de investigación, el cual representa un importante logro en nuestra formación como Ingenieros Civiles.

Manifestamos un especial agradecimiento al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander, por acogernos y brindarnos el acompañamiento académico, científico y técnico durante el desarrollo de esta investigación. Su compromiso con la generación de conocimiento y el fortalecimiento de la investigación fue fundamental para la ejecución de este proyecto.

A nuestra directora de tesis, Isabel Cristina Domínguez Rivera, le expresamos nuestro profundo agradecimiento por su orientación, dedicación, paciencia y constante acompañamiento a lo largo de este proceso. Sus conocimientos, experiencia y valiosas observaciones fueron determinantes para fortalecer la calidad de esta investigación y alcanzar los objetivos propuestos.

De igual manera, expresamos nuestra gratitud a nuestro codirector, Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, por su disposición, apoyo académico y valiosos aportes, los cuales enriquecieron significativamente el desarrollo de esta tesis y contribuyeron a nuestra formación profesional.

Extendemos también nuestro reconocimiento a los docentes de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, quienes, a lo largo de nuestra formación,

compartieron sus conocimientos, experiencias y principios éticos, contribuyendo de manera significativa a nuestro crecimiento académico y profesional.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias, amigos y a todas las personas que, de una u otra forma, nos brindaron su apoyo, confianza y motivación durante este proceso. Su comprensión, paciencia y respaldo fueron fundamentales para superar los desafíos encontrados en el camino y culminar con éxito este proyecto, que constituye un importante logro en nuestra formación y en el inicio de nuestra vida profesional.

Reconocimiento de uso de Inteligencia Artificial

En el desarrollo de este documento se utilizaron los modelos de lenguaje ChatGPT (OpenAI, 2026), Claude (Anthropic, 2026) y Gemini (Google, 2026) como soporte a la revisión y mejora de la redacción, reforzando la coherencia entre párrafos y corrigiendo aspectos gramaticales y ortográficos. Esto permitió presentar la información de manera más organizada, comprensible y formal, apoyando la presentación y organización del contenido, sin prescindir de la revisión crítica y la validación del contenido, la información y el desarrollo del análisis técnico por parte del autor.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. CUERPO DEL TRABAJO	16
2.1 Marco Referencial.....	16
2.1.1. Marco conceptual.....	16
2.1.2. Estado del arte.....	18
2.1.3. Antecedentes	19
2.2 Metodología	21
2.3 Resultados	23
2.3.1. Marco metodológico participativo para el monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa en la cuenca del río Tona	23
2.3.2. Estrategia participativa para el monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa en la cuenca del río Tona.....	30
2.3.3. Desarrollo de protocolos e instrumentos operativos para el monitoreo participativo de precipitación, temperatura y humedad relativa	37
3. CONCLUSIONES	43
4. RECOMENDACIONES.....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

Lista de tablas

Tabla 1. Caracterización geográfica y altitudinal de las experiencias de monitoreo participativo revisadas	54
Tabla 2. Actores institucionales relacionados con la gestión hídrica y el monitoreo participativo en la cuenca del río Tona	56
Tabla 3. Instrumentos normativos y de política pública relacionados con la gestión hídrica y el monitoreo participativo	57

Lista de Figuras

Figura 1. Localización de las subcuencas del río Tona	20
Figura 2. Actores relevantes para el diseño de la estrategia de monitoreo participativo en la cuenca del río Tona.	32
Figura 3. Instituciones educativas en la cuenca del río Tona	36
Figura 4. Distribución espacial de estaciones hidrometeorológicas y concesiones de agua en la cuenca del río Tona	59
Figura 5. Secuencia de actividades orientados a la comprensión de los servicios hidrológicos en la cuenca del río Tona.	60

Lista de apéndices

Apéndice A. Caracterización geográfica y altitudinal de las experiencias de monitoreo participativo revisadas	54
Apéndice B. Actores institucionales relacionados con la gestión hídrica y el monitoreo participativo en la cuenca del río Tona	56
Apéndice C. Instrumentos normativos y de política pública relacionados con la gestión hídrica y el monitoreo participativo	57
Apéndice D. Estaciones hidrometeorológicas de Tona y concesiones de agua en la cuenca del río Tona.	59
Apéndice E. Ruta general de la estrategia participativa	60
Apéndice F. Cartilla metodológica para la implementación del monitoreo participativo de variables hidroclimáticas en la cuenca del río Tona	60

Resumen

Título: Diseño de estrategias para el monitoreo participativo de variables hidroclimáticas orientadas a la comprensión de los servicios hidrológicos en la cuenca del río Tona.

Author: Anggie Paola Giraldo Ávila, Lizeth Camila Lara Cárdenas, Lina Marcela Ramírez Neira.

Palabras Clave: Monitoreo participativo, variables hidroclimáticas, precipitación, temperatura, humedad relativa, servicios hidrológicos.

Descripción: Este trabajo de grado presenta el diseño de un proceso de monitoreo participativo de variables hidroclimáticas, específicamente precipitación, temperatura y humedad relativa, como insumos clave para el análisis de servicios hidrológicos en la cuenca alta del río Tona, ubicada en el municipio de Tona, Santander. La investigación se desarrolló como un diseño metodológico aplicado, organizado en tres fases encadenadas: revisión y análisis de experiencias previas de monitoreo participativo en contextos internacionales, nacionales y locales; diseño del esquema general de la estrategia participativa para la cuenca; y elaboración de protocolos e instrumentos operativos para su futura implementación. A partir del análisis comparativo de once experiencias en ecosistemas de montaña de América Latina, África y Colombia, se identificaron metodologías, actores, niveles de participación y referentes útiles para orientar el diseño del proceso en la cuenca del río Tona. Con base en estos referentes, se diseñó una estrategia participativa centrada en las instituciones educativas, especialmente con estudiantes de educación media, como nodos territoriales estratégicos, articulada en cuatro talleres: lectura territorial del agua y los servicios hidrológicos; formación básica sobre variables hidroclimáticas y uso de instrumentos de medición, como pluviómetro, termómetro e higrómetro; e instalación participativa de los instrumentos, con definición de roles, protocolos de registro, análisis participativo de datos y devolución de resultados. La propuesta incorpora un mapa de actores que integra comunidades, acueductos veredales, autoridades locales, instituciones académicas y entidades ambientales, con énfasis en la participación de docentes y estudiantes. El plan operativo resultante incluye protocolos detallados, materiales didácticos y formatos de registro orientados a fortalecer la capacidad local de recolección y uso de información hidroclimática. Los resultados contribuyen a una gestión más colaborativa e inclusiva del recurso hídrico en la cuenca, alineada con el marco normativo colombiano de gestión integral del agua.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físico-mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera. Doctorado en Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural, con especialización en Gestión del Agua. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Doctor en Ingeniería, énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Abstract

Title: Design of strategies for participatory monitoring of hydroclimatic variables aimed at understanding hydrological services in the Tona River basin.

Author: Anggie Paola Giraldo Avila, Lizeth Camila Lara Cárdenas, Lina Marcela Ramírez Neira

Key Words: Participatory monitoring, Hydrological services, Water resources, Mountain ecosystems, Hydroclimatic variables, precipitation, temperature, relative humidity.

Description: This work presents the design of a participatory monitoring process for hydroclimatic variables, specifically precipitation, temperature, and relative humidity, as key inputs for analyzing hydrological services in the upper Tona River basin, located in the municipality of Tona, Santander. The research was developed as an applied methodological design, organized into three interconnected phases: review and analysis of previous participatory monitoring experiences in international, national, and local contexts; design of the general framework for the participatory strategy for the basin; and development of protocols and operational instruments for its future implementation. Based on a comparative analysis of eleven experiences in mountain ecosystems in Latin America, Africa, and Colombia, methodologies, stakeholders, levels of participation, and useful references to guide the design of the process in the Tona River basin were identified. Based on these references, a participatory strategy was designed, centered on educational institutions, especially with upper secondary students, as strategic territorial hubs, and structured around four workshops: territorial analysis of water and hydrological services; basic training on hydroclimatic variables and the use of monitoring instruments, such as rain gauges, thermometers, and hygrometers; participatory installation of the instruments, including the definition of roles and recording protocols; and participatory data analysis and feedback of results. The proposal incorporates a stakeholder map that integrates communities, rural aqueducts, local authorities, academic institutions, and environmental entities, with an emphasis on the active participation of teachers and students. The resulting operational plan includes detailed protocols, educational materials, and registration forms, all aimed at strengthening local capacity for collecting and using hydroclimatic information. The results contribute to a more collaborative and inclusive management of water resources in the basin, aligned with the Colombian regulatory framework for integrated water management.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Advisor: Isabel Cristina Domínguez Rivera. PhD in Agriculture, Food and Rural Development, with emphasis in Water Management. Co-advisor: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD in Engineering, with emphasis in Sanitary and Environmental Engineering.

Introducción

Los ecosistemas de montaña son infraestructuras naturales reconocidas como “torres de agua”, vitales para la provisión de servicios hidrológicos esenciales (Viviroli et al., 2007). Estas regiones cumplen funciones fundamentales en la captación, almacenamiento, regulación y suministro de agua dulce, e indispensables para la seguridad hídrica a través de la interceptación de lluvias, la regulación de escorrentías y la recarga de acuíferos (Buytaert et al., 2010; Millennium Ecosystem Assessment, 2005), gracias en parte a la vegetación nativa, que actúa como esponja natural reguladora del ciclo hidrológico (Bonnesoeur et al., 2019).

Estos ecosistemas son vulnerables a actividades humanas como la deforestación, la expansión agrícola y la urbanización, que alteran la regulación hídrica de las cuencas (Bruijnzeel, 2004), incrementan la escorrentía superficial y la erosión, comprometen la calidad del agua por arrastre de sedimentos y contaminantes (Bonnesoeur et al., 2019), y reducen la disponibilidad de agua, aumentando la vulnerabilidad ante sequías e inundaciones (Buytaert et al., 2006).

La comprensión integral de los procesos hidrológicos se limita cuando no se incorporan los saberes de las comunidades locales, lo que genera vacíos en la identificación de patrones estacionales, respuestas hidrológicas ante eventos extremos y cambios en la calidad del agua (Danielsen et al., 2009). Esta desconexión puede producir modelos hidrológicos incompletos y estrategias de gestión poco ajustadas a las realidades socioecológicas del territorio (Buytaert et al., 2014).

El monitoreo participativo de variables hidroclimáticas surge como una estrategia para fortalecer la comprensión de los servicios hidrológicos en ecosistemas de montaña, permitiendo registrar, mediante mediciones realizadas por la comunidad, variables como precipitación,

temperatura y humedad relativa. La precipitación constituye una variable de entrada fundamental para los procesos hidrológicos, mientras que la temperatura y la humedad relativa aportan información complementaria para interpretar condiciones atmosféricas locales y señales asociadas a lluvias intensas, sequías o variaciones en la disponibilidad hídrica, contribuyendo a fortalecer la capacidad local de adaptación y gestión del riesgo (Buytaert et al., 2014; Holguín & Cusguen, 2021).

El marco normativo colombiano respalda la gestión integral y participativa del recurso hídrico: la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico orienta la planificación a partir de objetivos de oferta, demanda, calidad y riesgo; los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), reglamentados por el Decreto 1640 de 2012, articulan la planificación y seguimiento de las cuencas; y el CONPES 3810 de 2014 aporta lineamientos para agua potable y saneamiento básico en zonas rurales, contexto relevante para comunidades vinculadas al uso y gestión local del agua.

En la cuenca del río Tona, estas condiciones adquieren especial importancia debido a su papel en el abastecimiento hídrico regional y a la presencia de dinámicas sociales y productivas asociadas al uso del territorio. Por ello, se plantea el siguiente interrogante: ¿Qué estrategias, actores y actividades pueden estructurarse en la cuenca del río Tona para acercar a las comunidades al monitoreo participativo de variables hidroclimáticas?

Con base en lo anterior, este trabajo de grado propone un proceso de monitoreo participativo de variables hidroclimáticas, específicamente precipitación, temperatura y humedad relativa, como insumos para el análisis de servicios hidrológicos en la cuenca alta del río Tona. La investigación plantea una propuesta operativa orientada a fortalecer la recolección y uso

comunitario de información hidroclimática, fomentando una gestión del agua más inclusiva y alineada con los principios de gestión integrada (Pahl-Wostl et al., 2007).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un proceso de monitoreo participativo de variables hidroclimáticas orientadas a la comprensión de los servicios hidrológicos en la cuenca alta del río Tona, mediante la estructuración de fases de implementación, protocolos técnicos y materiales de formación, con el fin de proporcionar un plan operativo que facilite su futura ejecución y fortalezca la gestión colaborativa del recurso hídrico.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir un marco metodológico participativo para el monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa en la cuenca del río Tona, a partir del análisis de experiencias previas y de la articulación con actores locales.
- Diseñar una estrategia participativa para el monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa en la cuenca del río Tona, identificando actores clave, definiendo roles y estructurando una secuencia de talleres orientados a la comprensión de los servicios hidrológicos.
- Desarrollar protocolos e instrumentos operativos para el monitoreo participativo de precipitación, temperatura y humedad relativa, incluyendo procedimientos de medición, formatos de registro y materiales didácticos.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Referencial

2.1.1. Marco conceptual

Ecosistemas de montaña

Los ecosistemas montañosos cubren una cuarta parte de la superficie terrestre y se caracterizan por su topografía accidentada y gradientes climáticos altitudinales (Tefera et al., 2024). Ecológicamente son fundamentales por sus servicios ecosistémicos de provisión, regulación y soporte, y sustentan una alta biodiversidad, pero son frágiles y vulnerables al cambio climático (Gheyret et al., 2020; Tefera et al., 2024).

En Colombia, la clasificación por pisos térmicos permite diferenciar montaña y alta montaña según rangos altitudinales: se considera montaña a los territorios por encima de los 1000 m s. n. m., abarcando los pisos templado (1000-2000 m s. n. m.) y frío (2000-3000 m s. n. m.), mientras que la alta montaña se restringe a los ecosistemas situados por encima del límite superior del bosque continuo (~3000 m s. n. m.), incluyendo páramo (3000-4000 m s. n. m.) y glaciar o nieves perpetuas (>4000 m s. n. m.) (IDEAM, 2012). La zona de interés se ubica en el rango de ecosistema de montaña, donde se concentran dinámicas sociales y productivas locales que justifican acciones de monitoreo participativo del recurso hídrico.

Servicios hidrológicos

Los servicios hidrológicos son los beneficios que los ecosistemas proporcionan en relación con la gestión del agua, incluyendo suministro, regulación del flujo, calidad del agua y mitigación de daños asociados a fenómenos hidrológicos; estos dependen de procesos como infiltración,

recarga de acuíferos y reducción de inundaciones o erosión, generando beneficios ecológicos y sociales (Carvalho-Santos et al., 2014; Varis et al., 2004).

Medición de los servicios hidrológicos

Los servicios hidrológicos se miden mediante modelos basados en procesos físicos, impulsados por datos y metodologías híbridas (Husic et al., 2022; Adera et al., 2024), junto con indicadores como duración, frecuencia, magnitud y tasas de cambio de eventos de flujo que cuantifican la funcionalidad del ciclo hidrológico y sus efectos ecológicos (Kiesel et al., 2017).

Monitoreo participativo

El monitoreo participativo se entiende como un proceso colaborativo en el que actores educativos, comunitarios, institucionales y técnico-científicos intervienen, de acuerdo con sus capacidades y responsabilidades, en la generación y análisis de información ambiental (Pilz et al., 2006). En este trabajo se adopta una perspectiva de participación gradual y diferenciada, que comprende la instalación de los instrumentos, el registro, la interpretación y la comunicación de los datos. Los docentes y estudiantes cumplen un papel operativo, las comunidades aportan conocimiento territorial y las entidades técnicas brindan capacitación y acompañamiento, aspectos necesarios para que la información generada pueda utilizarse en la gestión del agua (Buytaert et al., 2014).

Estrategias de monitoreo participativo

Las estrategias para el monitoreo participativo de servicios hidrológicos incluyen metodologías mixtas que integran ciencia ciudadana, sensores de bajo costo y tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con plataformas web y móviles para recolectar datos hidrológicos en períodos críticos (Cherif et al., 2025), junto con capacitaciones y empoderamiento comunitario, adaptándose a contextos locales (Flórez-Yepes et al., 2025).

2.1.2. Estado del arte

El monitoreo participativo ha evolucionado hacia la ciencia ciudadana, donde el público no especializado colabora en la recolección y análisis de datos (Conrad & Hilchey, 2011). Estos programas generan información de calidad comparable a la profesional, empoderan a las comunidades y fortalecen la gobernanza local (Danielsen et al., 2009). En el monitoreo basado en comunidades, los actores locales impulsan el proceso y utilizan la información para la toma de decisiones (Buckingham et al., 2018), reconociendo el papel de las comunidades en la gestión participativa del agua (Buytaert et al., 2014).

A pesar de sus beneficios, el monitoreo participativo enfrenta retos asociados a la continuidad de la participación comunitaria y la sostenibilidad del proceso en el tiempo (Conrad & Hilchey, 2011). También se han señalado desafíos relacionados con la calidad, consistencia y validación de los datos recolectados por actores no especializados (Danielsen et al., 2009). En el caso del monitoreo hidroclimático, estos retos se amplían por la necesidad de capacitación técnica, acompañamiento permanente y articulación entre comunidades e instituciones para que la información producida sea útil en la gestión del agua (Buytaert et al., 2014).

La integración entre conocimiento tradicional y científico es clave para la adaptación al cambio climático. Los saberes locales enriquecen la comprensión de la variabilidad climática (Chazdon et al., 2016), y su combinación con pronósticos científicos mejora la precisión de predicciones y favorece prácticas agrícolas adaptativas (Makondo & Thomas, 2018).

En Colombia, experiencias como el proyecto “Adaptación a los impactos climáticos en regulación y suministro de agua en el área de Chingaza – Sumapaz – Guerrero” (GEF Alta Montaña) han implementado redes de monitoreo comunitario en microcuencas de Cundinamarca, involucrando campesinos, instituciones educativas y organizaciones locales. Estas iniciativas han

priorizado la apropiación local del proceso, el uso de instrumentos asequibles y el fortalecimiento de capacidades para registrar y analizar variables agroclimáticas (Holguín & Cusguen, 2021). Asimismo, han demostrado que la ciencia participativa puede funcionar no solo como estrategia de recolección de datos, sino también como herramienta de aprendizaje, gestión y gobernanza del agua (Perevochtchikova et al., 2020).

La experiencia descrita por Holguín y Cusguen (2021) muestra que el monitoreo comunitario hidroclimático en territorios de alta montaña puede articular mediciones instrumentales sencillas, como precipitación, niveles de agua y temperatura, con observaciones locales sobre nubosidad, humedad del suelo y señales naturales asociadas a lluvias, sequías o heladas. Además, la devolución de resultados mediante carteleras, reuniones y boletines fortalece la apropiación social del conocimiento, la organización comunitaria y el vínculo con entidades institucionales, aspectos relevantes para orientar estrategias de monitoreo participativo del recurso hídrico.

2.1.3. Antecedentes

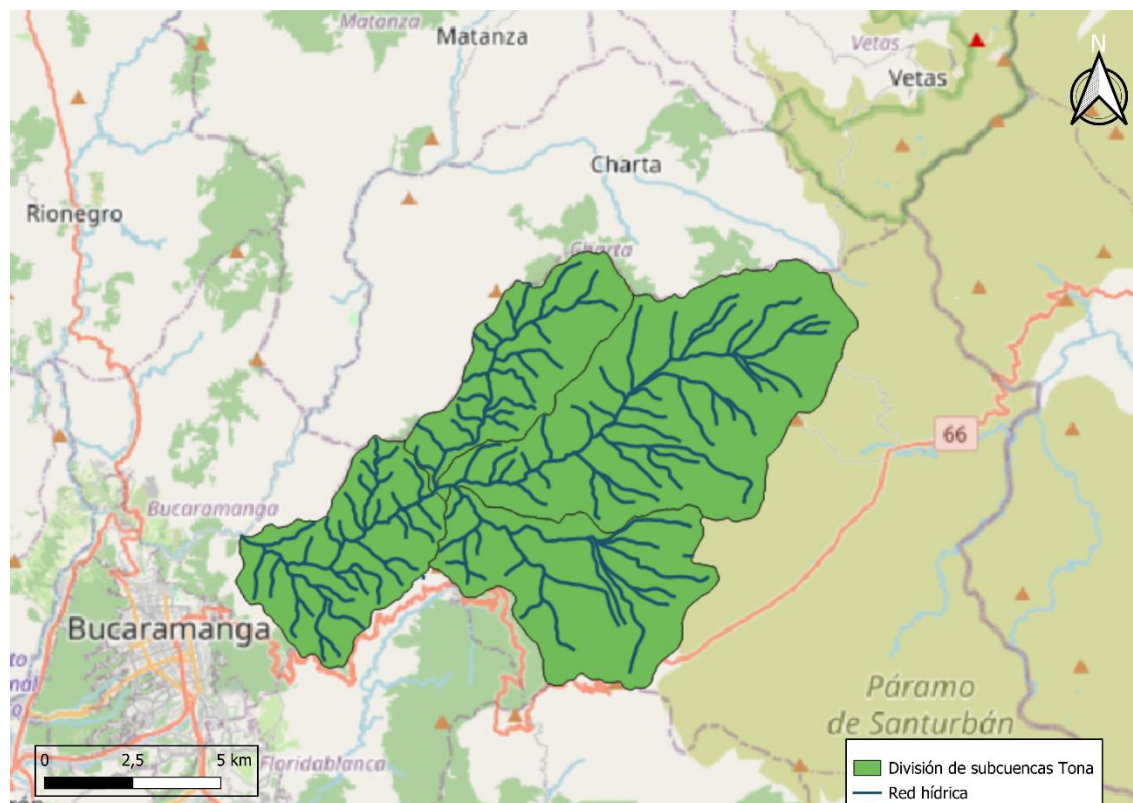
Contexto de la cuenca del río Tona

La cuenca del río Tona es una unidad hidrográfica de montaña estratégica para el abastecimiento hídrico de Bucaramanga y su área metropolitana. Tiene una extensión de 193.8 km², se localiza principalmente en Tona y comprende 19 veredas, con marcado gradiente altitudinal y climático: en la parte alta oriental registra temperaturas medias cercanas a 6 °C, mientras hacia el occidente los máximos medios oscilan entre 22 y 23 °C (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga [CDMB], 2005, 2024b). El río Tona nace entre los páramos de Pescadero y Santurbán, en el Macizo de Santander, y abastece las plantas La Flora y Morrórico, lo que sustenta su importancia para la seguridad hídrica regional (Acueducto

Metropolitano de Bucaramanga [amb], s. f.-a). En el territorio predomina una economía agropecuaria, con agricultura, ganadería, cultivos transitorios y permanentes, además de minería localizada de mármol y calizas (CDMB, 2005; Alcaldía Municipal de Tona, 2000). Estas condiciones evidencian dinámicas sociales y productivas que demandan gestión integral del agua y del suelo (CDMB, 2022a).

La Figura 1 presenta la localización de las subcuencas del río Tona, su red hídrica y los centros urbanos de referencia, lo cual permite establecer un marco espacial para la selección de puntos de monitoreo en la cuenca.

Figura 1. Localización de las subcuencas del río Tona



Nota: Elaboración propia con base en cartografía proporcionada por Daniel Moreno, comunicación personal, 2026, y procesamiento en QGIS.

2.2 Metodología

El trabajo se desarrolló como un diseño metodológico aplicado, orientado a formular un plan operativo para el monitoreo participativo de variables hidroclimáticas, precipitación, temperatura y humedad relativa, en la cuenca alta del río Tona, por su utilidad para interpretar condiciones locales asociadas a la dinámica hídrica y la comprensión de servicios hidrológicos. La metodología se organizó en tres fases encadenadas, definiendo insumos principales, fuentes de información, tratamiento de datos y productos resultantes correspondientes.

Fase 1: Revisión y análisis de experiencias de monitoreo participativo

Esta fase consistió en revisar, organizar y analizar once experiencias previas de monitoreo participativo en contextos internacionales, nacionales y locales, con énfasis en ecosistemas de montaña, e incluyó experiencias de otros rangos altitudinales por sus aprendizajes relevantes sobre métodos participativos, actores, variables monitoreadas, instrumentos de medición, capacitación y sostenibilidad del proceso.

La información se obtuvo mediante búsqueda sistemática en bases académicas internacionales (Scopus y Web of Science) y revisión de informes técnicos de proyectos colombianos, entre ellos GEF Alta Montaña (Holguín & Cusguen, 2021), además del marco normativo del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010; Decreto 1640 de 2012; Decreto 1076 de 2015; CONPES 3810 de 2014).

La información se organizó en matrices comparativas según contexto, metodologías, actores, variables monitoreadas, instrumentos, resultados y aprendizajes transferibles, permitiendo identificar criterios para adaptar la estrategia participativa a la cuenca del río Tona.

Fase 2: Esquema general de la estrategia participativa para la cuenca del río Tona

Esta fase definió la estructura general del proceso participativo para la cuenca del río Tona, mediante la identificación y caracterización de actores territoriales potenciales, como comunidades, acueductos comunitarios, juntas de acción comunal, organizaciones locales, instituciones educativas, actores universitarios, autoridades ambientales, entidades territoriales y apoyos técnicos. Con base en esta caracterización, se seleccionaron los actores clave del proceso según su relación directa con la gestión del agua, presencia territorial, capacidad de convocatoria, posibilidad de continuidad en el tiempo y aporte operativo al monitoreo. Para estos actores se definió su posible rol, nivel de participación y aporte al monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa.

También se estableció la secuencia de actividades con una lógica progresiva: reconocimiento del territorio, formación básica, instalación y registro de datos, y análisis participativo con devolución de resultados. Para cada actividad se definieron propósito, público objetivo, productos esperados y cronograma general de implementación futura, a partir de los criterios de la fase 1 y de fuentes secundarias del territorio. Como resultado, se consolidó una estrategia general con actores clave, ruta metodológica, actividades propuestas, productos por momento, mapas base y lineamientos para orientar el monitoreo participativo de variables hidroclimáticas.

Fase 3: Diseño detallado de los protocolos que integran la estrategia propuesta

Esta fase transformó la estrategia general en instrumentos operativos para una futura implementación: protocolos para las actividades de la fase 2 (guion metodológico, roles, recursos,

materiales didácticos, requerimientos logísticos y formatos de registro) y protocolos técnicos para el monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa (métodos de medición, instrumentos, periodicidad, responsables y criterios de calidad de los datos).

Los insumos provinieron de la estrategia construida en la fase 2 y de las buenas prácticas identificadas en la fase 1, dando como resultado un compendio de protocolos, materiales de apoyo y anexos operativos que constituye el plan de implementación futura del monitoreo participativo en la cuenca del río Tona.

2.3 Resultados

2.3.1. Marco metodológico participativo para el monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa en la cuenca del río Tona

Con base en el análisis comparativo de once experiencias de monitoreo participativo desarrolladas en distintos contextos geográficos (algunas en ecosistemas de montaña y alta montaña, y otras en tierras bajas o costeras), se analizaron sus alcances, actores, tipos de intervención y metodologías aplicadas. Las experiencias de otros rangos altitudinales se incluyeron por sus aportes en métodos participativos, niveles de involucramiento comunitario, herramientas de recolección de datos, capacitación y sostenibilidad, como insumos para el diseño de la estrategia en la cuenca del río Tona.

Síntesis de experiencias por país

Los once casos revisados abarcan distintos ámbitos geográficos: en Latinoamérica, Ecuador (Zeballos et al., 2025), Brasil, Chile, Costa Rica, El Salvador y Guatemala (Blanco-Ramírez et al., 2025), y México (Perevochtchikova & Sandoval-Romero, 2020; Cosmes-Guzmán

et al., 2024); en África, Tanzania (Gomani et al., 2010; Ndomba et al., 2010) y Sudáfrica (Kongo et al., 2010); y en Colombia, la microcuenca del río Frío en Santander (Contreras-Gómez & Muller-Rueda, 2021), la cuenca del río Negro en el Oriente Antioqueño (Zuluaga Restrepo & Perea Tamayo, 2020), el complejo de páramos Jurisdicciones Santurbán-Berlín (Cárdenas & Ortiz-Riomalo, 2018) y la cuenca del río Chinchiná (Flórez-Yepes et al., 2025).

Región y ecosistema

Las experiencias analizadas se desarrollaron en ecosistemas de montaña y pueden agruparse según el contexto socio ecológico, la escala, el clima y el ecosistema predominante. En contextos de importancia turística y clima de alta montaña ecuatorial, se encuentra la experiencia en el páramo andino de Ecuador, a nivel de cuenca (Zeballos et al., 2025). En ecosistemas de interés por su biodiversidad, se identificaron estudios en bosques andinos y altoandinos de Colombia a escala de cuenca (Flórez-Yepes et al., 2025; Zuluaga Restrepo y Perea Tamayo, 2020); en las subcuencas de Santurbán con clima de alta montaña tropical (Cárdenas y Ortiz-Riomalo 2018); y en bosques templados de Oaxaca, México, con clima templado local (Cosmes-Guzmán et al. 2024). En contextos agrícolas y ganaderos, se reportan experiencias en praderas de montaña de Sudáfrica con clima subtropical a escala de cuenca (Kongo et al. 2010), en cuencas tropicales de Tanzania con clima de sabana (Gomani et al. 2010; Ndomba et al. 2010), y en la microcuenca andina de media altura de Santander, Colombia (Contreras-Gómez y Muller-Rueda 2021). En zonas periurbanas se identificaron experiencias locales en bosques templados de la Ciudad de México con clima templado subhúmedo (Perevochtchikova y Sandoval-Romero 2020), así como en múltiples ecosistemas fluviales y de montaña de Latinoamérica, con climas tropical, subtropical y templado (Blanco-Ramírez et al. 2025).

Objetivos de las investigaciones o programas

Los objetivos de los programas de monitoreo participativo revisados se centran en involucrar a las comunidades en el cuidado y monitoreo del agua. En Latinoamérica, se analizó una aplicación global de ciencia ciudadana para recolectar datos sobre niveles y condiciones del agua vía teléfonos móviles (Blanco-Ramírez et al. 2025). En Ecuador (páramos del Parque Nacional Cajas), se evaluó la viabilidad de que turistas y comunidades generaran datos meteorológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa) e hidrológicos (nivel del agua, turbidez) mediante una aplicación móvil, para mejorar la gestión hídrica frente al cambio climático (Zeballos et al. 2025). En Colombia, en Río Frío (Santander), se diseñó una hoja de ruta para que las comunidades monitorearan parámetros físicos, químicos y biológicos con fines de saneamiento (Contreras-Gómez y Muller-Rueda 2021); en Santurbán, el trabajo se orientó a construir confianza y acuerdos entre mineros, agricultores, comunidades y entidades del Estado para el manejo sostenible de las cuencas Suratá, Zulia y Pamplonita (Cárdenas y Ortiz-Riomalo 2018). En México (Oaxaca), se generó evidencia técnica sobre parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y de disponibilidad hídrica para respaldar decisiones comunitarias sobre manejo forestal (Cosmes-Guzmán et al. 2024). En Tanzania, diversos proyectos instalaron redes de monitoreo con participación local (Kongo et al. 2010; Ndomba et al. 2010), destacando la red hidrometeorológica de Gomani et al. (2010) en la cuenca Ngerengere, que midió parámetros climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento), caudal superficial, niveles de aguas subterráneas someras y profundas, y propiedades de vegetación y suelo.

Enfoque participativo, nivel de participación y actores

Para comparar las experiencias, la participación se caracterizó según el papel de los actores en el diseño del proceso, la recolección de datos, la interpretación de resultados y la toma de decisiones. Se consideró contributiva cuando la comunidad participó principalmente en la recolección de información; colaborativa cuando también intervino en la planificación o interpretación; y de cogestión cuando compartió responsabilidades y decisiones sobre el proceso.

En Ecuador se identificó una participación contributiva, pues los investigadores diseñaron la metodología y los actores locales recolectaron los datos (Zeballos et al., 2025). CrowdWater presentó un enfoque similar mediante una aplicación diseñada por científicos (Blanco-Ramírez et al., 2025). En Tanzania se observó una participación colaborativa, debido a la intervención comunitaria en la definición del alcance y el cuidado de los equipos (Gomani et al., 2010). En Sudáfrica se identificó cogestión, con participación en la planificación del muestreo, la construcción de aforos y la interpretación de resultados (Kongo et al., 2010). En México se presentó un enfoque contributivo-colaborativo en Ciudad de México (Perevochtchikova & Sandoval-Romero, 2020) y una participación colaborativa con incidencia en las decisiones en Oaxaca (Cosmes-Guzmán et al., 2024).

Los actores variaron según el contexto e incluyeron comunidades locales, agricultores, organizaciones indígenas, técnicos, autoridades ambientales, instituciones académicas, acueductos veredales y Juntas de Acción Comunal. Su papel comprendió la recolección de datos, el cuidado de los instrumentos, el aporte de conocimiento territorial y la interpretación de los resultados, mientras los equipos técnicos orientaron la metodología y la capacitación.

Actividades, talleres, materiales didácticos y modalidad

Las experiencias revisadas muestran diferentes formas de organizar actividades, talleres y materiales según el contexto: en Latinoamérica, CrowdWater combinó reuniones, talleres de la aplicación, visitas a ríos y seguimiento posterior, con app móvil e instructivos en línea, en modalidad mixta (Blanco-Ramírez et al. 2025); en Tanzania, Gomani et al. (2010) priorizaron consultas comunitarias, visitas de campo y capacitación para medir caudal con mapas y protocolos estandarizados en modalidad presencial, mientras Ndomba et al. (2010) instalaron estaciones y enseñaron el uso de reglas y recipientes para medir nivel del agua y lluvia, con formatos y guías básicas; y en Sudáfrica, Kongo et al. (2010) combinaron reuniones, demostraciones prácticas y un foro mensual con agricultores, usando cartillas y mapas de cuenca, en modalidad presencial.

En México, dos experiencias contrastantes: en Ciudad de México, talleres de capacitación y salidas periódicas al campo con instrumentos científicos operados por la comunidad (Perevochtchikova y Sandoval-Romero 2020); y en Oaxaca, capacitación en medición de calidad y cantidad de agua, manejo de equipos y gobernanza, con manuales técnicos, formatos y equipos multiparamétricos, con resultados discutidos en asambleas comunitarias (Cosmes-Guzmán et al. 2024). En Colombia, Contreras-Gómez y Muller-Rueda (2021) propusieron mesas participativas con capacitación práctica, aplicaciones y redes sociales; Cárdenas y Ortiz-Riomalo (2018) realizaron doce talleres comunitarios de acuerdos, demostración de equipos y discusión de resultados con cartografía social y plataforma web, en modalidad mixta; Zuluaga Restrepo y Perea Tamayo (2020) propusieron talleres de diseño con cinco sesiones y capacitación en gestión del agua con mapas y formatos tipo acta; y Flórez-Yepes et al. (2025) desarrollaron talleres de introducción, selección de indicadores, capacitación técnica y evaluación con fichas, termómetros

y recipientes graduados. Estos casos muestran que las actividades, talleres y materiales se adaptan según los actores, el tiempo disponible y los objetivos de participación.

Retos y oportunidades

La conectividad limitada y la brecha digital condicionaron la participación en Ecuador y Latinoamérica (Zeballos et al., 2025; Blanco-Ramírez et al., 2025); sostener el voluntariado fue una dificultad recurrente desde Río Frío hasta México, Tanzania y Sudáfrica (Contreras-Gómez y Muller-Rueda, 2021; Perevochtchikova y Sandoval-Romero, 2020); y la financiación inestable limitó el mantenimiento de equipos y el acompañamiento técnico en Tanzania (Gomani et al., 2010; Ndomba et al., 2010). Estas dificultades reflejan, en buena parte, experiencias donde actores externos definieron la metodología y las variables, mientras la comunidad participó principalmente en la recolección de datos, con niveles de involucramiento cercanos a lo contributivo (Blanco-Ramírez et al., 2025; Zeballos et al., 2025).

A ello se sumaron el desajuste entre necesidades locales y aplicaciones globales en CrowdWater (Blanco-Ramírez et al., 2025), tensiones institucionales y desconfianza entre actores en Santurbán y el río Chinchiná (Cárdenas y Ortiz-Riomalo, 2018; Flórez-Yepes et al., 2025), daños en equipos por rayos en Sudáfrica (Kongo et al., 2010); y complejidad logística por territorios extensos en Oaxaca (Cosmes-Guzmán et al., 2024).

De estas dificultades surgieron aprendizajes relevantes para la cuenca del río Tona: en Ecuador, es más confiable apoyarse en la comunidad local que en turistas ocasionales (Zeballos et al., 2025); en Latinoamérica, CrowdWater recomienda un diagnóstico previo de conectividad y co-diseño local de variables (Blanco-Ramírez et al., 2025); en Tanzania, un modelo de seis pasos insiste en la corresponsabilidad en el cuidado de los equipos (Gomani et al., 2010); y en el sistema

Suratá, del cual Tona hace parte, la metodología de Cárdenas y Ortiz-Riomalo (2018) constituye un antecedente relevante, que identificó retos como la dificultad para mantener la participación activa de actores de la parte alta de la cuenca, el riesgo de que el monitoreo sea percibido como instrumento de sanción, y la falta de participación amplia, que dificultó acuerdos de mayor alcance. En México, se aporta la necesidad de un diagnóstico contextual y selección participativa de variables (Perevochtchikova y Sandoval-Romero, 2020). En Oaxaca, el monitoreo comunitario puede escalar a certificaciones (Cosmes-Guzmán et al., 2024); y en Colombia, se refuerza la importancia de la capacitación presencial y el acompañamiento técnico inicial (Flórez-Yepes et al., 2025; Zuluaga Restrepo y Perea Tamayo, 2020).

El Apéndice A, presenta la caracterización geográfica y altitudinal de once experiencias de monitoreo participativo revisadas en ecosistemas de montaña de América del Sur, América Central y el Caribe, América del Norte y África, con su respectiva cita.

Marco institucional

El marco institucional de gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Tona reúne entidades nacionales, regionales y locales, además de actores técnico-académicos, cuyas funciones se articulan en torno a la planificación, regulación, monitoreo y uso sostenible del agua. Entre ellas se encuentran el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb), la Alcaldía Municipal de Tona y la Universidad Industrial de Santander (UIS), con papel fundamental en la generación de lineamientos, producción de información e

implementación territorial, siendo referentes clave para el diseño y desarrollo de estrategias de monitoreo participativo.

El Apéndice B, presenta los principales actores institucionales vinculados con la gestión hídrica, la regulación ambiental, la prestación de servicios públicos, la investigación académica y la cooperación técnica relevantes en la cuenca del río Tona.

Marco normativo de referencia

El marco normativo que orienta la gestión del recurso hídrico en Colombia está constituido por leyes, políticas y decretos que establecen principios, instrumentos y lineamientos para su planificación, uso y conservación. Estas disposiciones definen competencias institucionales y mecanismos de gestión del agua, e incorporan participación, gobernanza y sostenibilidad ambiental, sustentando el monitoreo participativo en la cuenca del río Tona al articular la planificación de cuencas, la generación de información y la participación comunitaria.

El Apéndice C, sintetiza los principales instrumentos normativos y de política pública relacionados con la gestión integral del recurso hídrico, la planificación ambiental, el ordenamiento de cuencas y la participación comunitaria en procesos de monitoreo.

2.3.2. Estrategia participativa para el monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa en la cuenca del río Tona

En la Fase 2 se diseñó la estrategia participativa para el monitoreo de servicios hidrológicos en la cuenca del río Tona, identificando y caracterizando los actores clave del territorio, definiendo sus roles y responsabilidades, y estableciendo los mecanismos de articulación necesarios para garantizar su involucramiento efectivo.

Actores relevantes de la cuenca del río Tona

La cuenca del río Tona reúne actores sociales, institucionales, educativos y técnico-científicos, cuya interacción es determinante para la gestión sostenible del recurso hídrico. En el componente comunitario destacan los usuarios de acueductos comunitarios y veredales, las Juntas de Acción Comunal (JAC), los pobladores de zonas altas y organizaciones de productores de café, aguacate, lácteos y cebolla (Red ABC, 2023; CDMB, 2005), con participación relevante en procesos de concertación, veeduría y apropiación territorial, reconocidos en acciones recientes de monitoreo participativo y gobernanza del agua en la unidad hidrográfica del río Tona (CDMB, 2023a, 2023b).

Las comunidades educativas también son actores estratégicos: las escuelas rurales y el Colegio Rafael Uribe Uribe son espacios importantes para la educación ambiental y el fortalecimiento de capacidades locales.

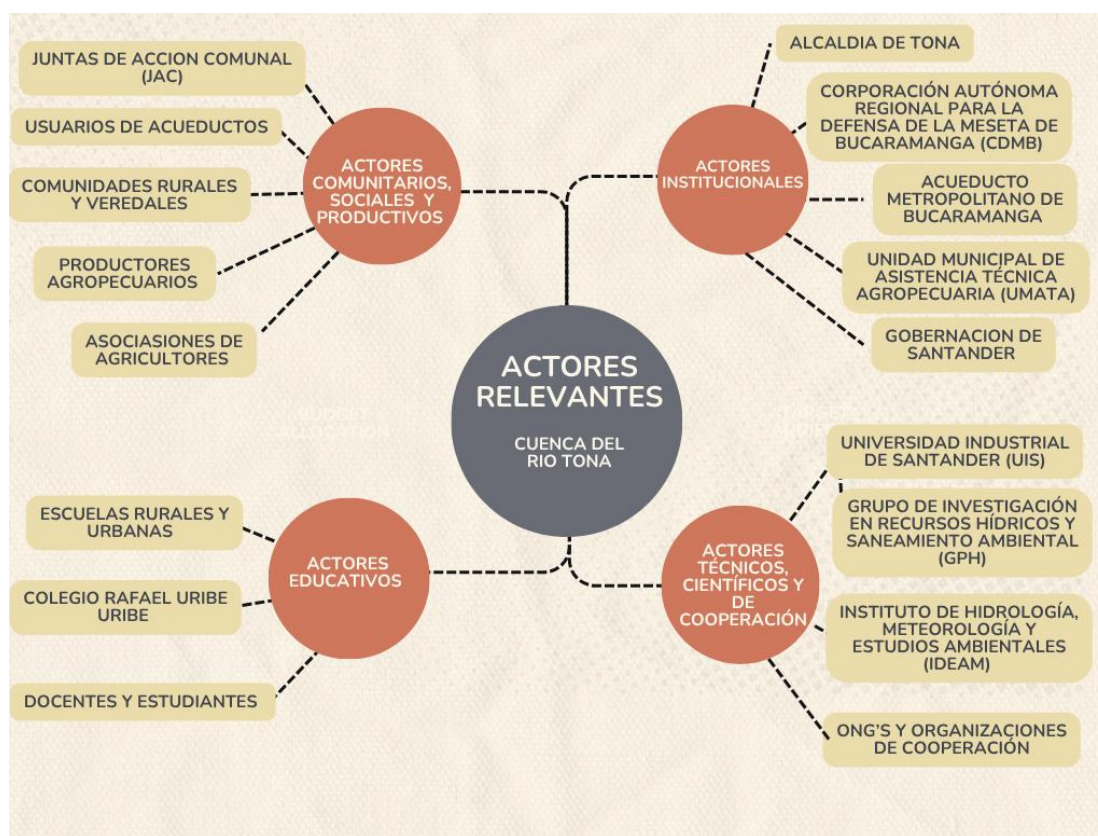
En el ámbito institucional se identifican la Alcaldía Municipal de Tona, la Alcaldía de Bucaramanga, la CDMB, la Gobernación de Santander y el amb, clave para la planificación territorial, la gestión ambiental y el abastecimiento hídrico, pues depende del río Tona para tratar y suministrar agua potable a Bucaramanga (amb, s. f.-a). Se suman actores técnico-científicos como la UIS a través del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) y el IDEAM, con soporte metodológico y científico en hidrología, calidad del agua y abastecimiento (UIS, s. f.). En cooperación y sociedad civil, la Alianza BioCuenca, las Autoridades Holandesas del Agua (DWA), mediante el programa InspirAgua, y la Red Vital son actores relevantes con presencia activa en el territorio (CDMB, 2023a; Red ABC, 2023).

En conjunto, esta red muestra que la gestión de la cuenca depende de la coordinación entre comunidades, organizaciones de productores, autoridades, prestadores del servicio, actores

técnico-científicos y organizaciones de cooperación, esencial para la gobernanza del recurso hídrico y la sostenibilidad ambiental del territorio (CDMB, 2023a, 2023b).

La Figura 2 presenta los actores relevantes para el diseño del monitoreo participativo en la cuenca del río Tona, clasificados por sectores educativo, comunitario, institucional y técnico.

Figura 2. Actores relevantes para el diseño de la estrategia de monitoreo participativo en la cuenca del río Tona.



Nota: Elaboración propia con base en Alcaldía Municipal de Tona (2000, 2004), Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (s. f.-a, s. f.-b, 2024b), Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (s. f.-b, s. f.-c), Universidad Industrial de Santander

(s. f.-a), *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales* (s. f.), *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* (2010, 2021) y *Buckingham et al.* (2018).

Acueductos urbanos y veredales

En la cabecera municipal, el acueducto es operado por el municipio y cubre 140 predios urbanos, aunque 18 viviendas de la parte alta no reciben el servicio por red y se abastecen directamente de una bocatoma en Alto de Tomasa (Alcaldía Municipal de Tona, 2000, 2004). En Berlín, el acueducto es administrado por la corporación Corpaberlin, sin potabilización, y abastece 190 predios; en La Corcova el servicio es precario, con conducción por mangueras y una planta de tratamiento abandonada (Alcaldía Municipal de Tona, 2000, 2004).

Estas condiciones heterogéneas de operación y cobertura del servicio evidencian la necesidad de que los acueductos veredales cuenten con información continua sobre la dinámica hídrica de la cuenca. Los acueductos veredales son beneficiarios directos del agua que genera la cuenca del río Tona, por lo que requieren estar informados de manera continua sobre el comportamiento de variables como el caudal, la calidad del agua y la regulación hídrica. Su vinculación al monitoreo participativo es fundamental, pues su conocimiento empírico y dependencia del agua los convierte en aliados estratégicos para la gestión sostenible. En la cuenca se han identificado 12 acueductos veredales, distribuidos en las subcuencas de Tona alta y baja, Arnanía, Río Frío, Golondrinas, Arenales y El Saladito, con caudales entre 0.61 y 20 L/s y cotas de captación entre 1430 y 3450 m s. n. m. (Alcaldía Municipal de Tona, 2004). La información generada beneficiará a los acueductos y puede compartirse con escuelas, autoridades ambientales y centros educativos, fortaleciendo así una red local de gestión del agua.

El Apéndice D, muestra la distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas de Tona y las concesiones de agua identificadas en la cuenca, con el fin de reconocer puntos de referencia útiles para la planeación del monitoreo participativo.

Un aspecto clave para definir la estrategia es que las condiciones de abastecimiento en la cuenca son heterogéneas, con limitaciones técnicas de captación, tratamiento y continuidad del servicio en algunos casos. Por ello, entre el conjunto de variables posibles asociadas al recurso hídrico, se priorizaron para el desarrollo de este trabajo la precipitación, la temperatura y la humedad relativa, debido a su relación con la dinámica hidrológica local, su utilidad para interpretar condiciones de disponibilidad hídrica y su viabilidad operativa en contextos educativos. A diferencia de variables como caudal o calidad del agua, que requieren mayor capacitación técnica, equipos especializados, protocolos de calibración y acompañamiento permanente, estas tres variables pueden medirse con instrumentos sencillos, de bajo costo y fácil apropiación social, como pluviómetros, termómetros e higrómetros.

Lo anterior no significa que en fases posteriores se pueda realizar el monitoreo de la cantidad y calidad del recurso hídrico; sin embargo, es necesario inicialmente fortalecer las redes de colaboración entre actores comunitarios e institucionales, y la consecución de recursos que permitan inversiones para facilitar dicho monitoreo.

Esta selección permite iniciar el monitoreo con una estrategia comprensible y sostenible para docentes, estudiantes y comunidades, consolidar resultados iniciales y, posteriormente, ampliar el alcance hacia otras variables con la participación de acueductos veredales y actores técnicos.

Instituciones educativas como nodos estratégicos

La revisión de experiencias de la Fase 1 mostró que los procesos más exitosos se apoyan en actores con presencia territorial permanente, arraigo comunitario y capacidad de convocatoria, destacando el papel de las instituciones educativas como espacios estratégicos para la formación, la apropiación del conocimiento y la continuidad de los procesos en el tiempo (Holguín & Cusguen, 2021; Flórez-Yepes et al., 2025). En coherencia con estos antecedentes y con las características del territorio, la estrategia diseñada concentrará su foco en las instituciones educativas como nodos de articulación comunitaria, sin desconocer el rol de otros actores sociales, institucionales y técnico-científicos de la cuenca.

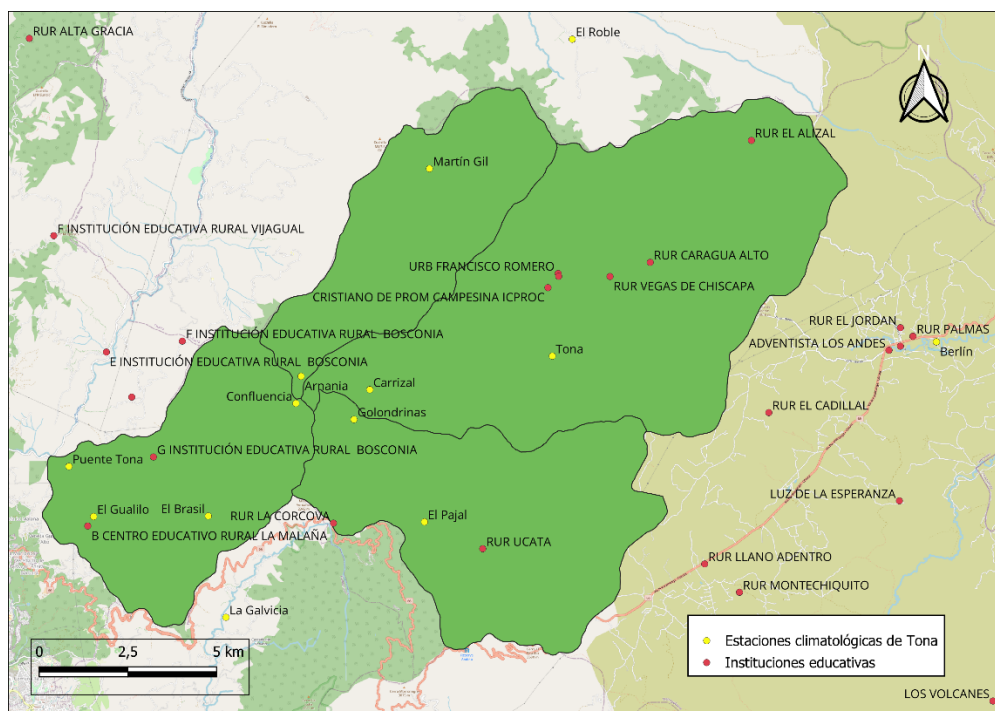
La ubicación de las instituciones educativas en veredas y en el centro del municipio las convierte en puntos estratégicos para la construcción de conocimiento y la continuidad del proyecto, funcionando como nodos territoriales que articulan enseñanza, participación comunitaria y apropiación social del conocimiento (Ministerio de Educación Nacional, 1994; CDMB, 2016).

A partir de la revisión de mapas y documentos se identificaron las sedes educativas activas en la cuenca, nodos estratégicos para la implementación del proyecto: el Colegio Integrado Rafael Uribe Uribe y el Colegio Luz de la Esperanza, en Tona, además de la Escuela Francisco Romero y el Colegio Adventista Los Andes. El análisis espacial mediante QGIS complementó este inventario, reconociendo una red de aproximadamente 25 sedes educativas entre el casco urbano y la zona rural, incluyendo ICPROC y la sede rural del Colegio Adventista Los Andes. Esta identificación no repite el inventario institucional ya señalado, sino que evidencia la cobertura territorial de la red educativa y su potencial como soporte del monitoreo participativo (Datos Abiertos Colombia, 2026a, 2026b, 2026c; QGIS.org, 2026).

En conjunto, esta estructura educativa, integrada por instituciones públicas y privadas con presencia urbana y rural, constituye una red de espacios estratégicos para el monitoreo participativo, adecuados para enseñar, trabajar con las familias, compartir saberes y recolectar información, funcionando como centros de encuentro que promueven la participación de niños y jóvenes (Ministerio de Educación Nacional, 1994).

La Figura 3 presenta la distribución espacial de las instituciones educativas y su relación con las estaciones climatológicas existentes, lo cual aporta un criterio territorial para orientar la selección preliminar de instituciones participantes.

Figura 3. Instituciones educativas en la cuenca del río Tona



Nota: Elaboración propia con base en cartografía proporcionada por Daniel Moreno, comunicación personal, 2026, y procesamiento en QGIS.

2.3.3. Desarrollo de protocolos e instrumentos operativos para el monitoreo participativo de precipitación, temperatura y humedad relativa

La formulación de los protocolos se sustentó en los resultados de la fase 1, donde se identificó que los procesos participativos suelen iniciar con articulación de actores, reconocimiento territorial y formación inicial antes de avanzar al monitoreo. Esta lógica se observa en consultas comunitarias en Tanzania (Gomani et al., 2010), mesas de trabajo en Río Frío (Contreras-Gómez & Muller-Rueda, 2021), cartografía social en Santurbán (Cárdenas & Ortiz-Riomalo, 2018) y talleres de gestión en Río Negro (Zuluaga Restrepo & Perea Tamayo, 2020).

El alcance de la estrategia se orienta a estudiantes de educación media de las instituciones seleccionadas, quienes al finalizar el proceso podrán reconocer las variables monitoreadas, usar pluviómetro, termómetro e higrómetro, registrar los datos en formatos establecidos y participar en su interpretación básica en relación con las condiciones hídricas del territorio.

Con base en estos antecedentes, se contempla una etapa previa de selección y acercamiento a instituciones educativas. Una vez definidas las instituciones participantes, se desplegará la estrategia, iniciando con una lectura territorial del agua articulada con los servicios hidrológicos y la importancia del monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa.

A continuación, se describe el Apéndice E, donde se sintetiza la estrategia participativa organizada en una etapa previa y cuatro talleres para el reconocimiento del territorio, la formación en variables hidroclimáticas, la instalación de instrumentos y la devolución de resultados en la cuenca del río Tona.

Etapla previa. Selección y acercamiento a instituciones educativas

Antes del desarrollo de los talleres se realizará esta etapa previa, justificada en que los procesos de monitoreo participativo requieren primero identificar actores, reconocer condiciones locales y verificar la disposición de participación.

Se definirán criterios de preselección (ubicación en la cuenca, distancia a estaciones climatológicas, relación con problemáticas hídricas, interés institucional, conectividad y posibilidad de continuidad), aplicados mediante una lista de chequeo que facilita una preselección objetiva. El acercamiento a las instituciones preseleccionadas seguirá un protocolo estructurado: contacto inicial por correo con el rector o director para presentar la propuesta y solicitar una reunión; reunión con el rector, coordinador académico y el docente responsable para socializar objetivos, alcance y compromisos de la vinculación; un espacio para resolver dudas y verificar condiciones mínimas (espacio para pluviómetro, termómetro e higrómetro, docente responsable y capacidad de lecturas diarias); manifestación formal de intención, verbal o por correo; y registro del resultado en formato estandarizado. Se seleccionarán al menos dos instituciones que cumplan los criterios oferta de grados de educación media, acceso vial y conectividad y que hayan ratificado su interés, designado un responsable, garantizado el acceso al espacio de instalación, con compromiso de lecturas diarias, cuidado de los equipos y participación en las actividades programadas.

Taller 1. Lectura territorial del agua y servicios hidrológicos

Este taller se diseñó a partir de las lecciones identificadas en la Fase 1 sobre la importancia de iniciar los procesos participativos con reconocimiento territorial e identificación de problemáticas. La actividad busca que los estudiantes de las instituciones vinculadas reconozcan,

desde su experiencia cotidiana, la relación entre el territorio, el agua y los servicios hidrológicos, y comprendan la utilidad del monitoreo de la precipitación en la cuenca.

Se realizará una actividad de lectura territorial del agua mediante mesa de trabajo y cartografía social, en la que los estudiantes identificarán colectivamente fuentes hídricas, usos del agua, zonas de abastecimiento y problemáticas percibidas, y se aplicará un instrumento sencillo para recoger sus percepciones sobre el agua y su disposición a participar en las siguientes actividades.

Taller 2. Formación básica sobre precipitación, temperatura y humedad relativa, y uso del pluviómetro, termómetro e higrómetro

Este taller se diseñó a partir de experiencias que combinan formación inicial, uso de instrumentos sencillos y capacitación para el registro de variables. El segundo taller iniciará con la devolución de los resultados del Taller 1 para su validación, seguida de la presentación de la propuesta de monitoreo participativo: qué es, para qué sirve, qué se propone medir y cuáles serían los roles de la comunidad educativa y del equipo investigador.

El proceso de monitoreo se centrará en precipitación, temperatura y humedad relativa, variables clave para la dinámica hídrica local. Se realizará una introducción conceptual sobre estas variables, su relación con la disponibilidad de agua, sus unidades de medición y el funcionamiento básico del pluviómetro, termómetro e higrómetro, como preparación para el taller práctico de instalación, operación y mantenimiento.

Taller 3. Instalación participativa de los instrumentos de medición meteorológica, operación y registro de datos

Este taller se diseñó como una actividad práctica de instalación del pluviómetro, termómetro e higrómetro en las instituciones educativas seleccionadas y las estaciones meteorológicas cercanas, para que el monitoreo no se limitará a una explicación conceptual, sino que incorporara la puesta en marcha del instrumento en condiciones reales.

Durante el taller se realizará la selección participativa del sitio de instalación, considerando criterios como exposición directa a la lluvia, ausencia de obstáculos, seguridad del equipo, facilidad de acceso para la lectura diaria y posibilidad de mantenimiento por docentes y estudiantes.

Posteriormente se instalarán los instrumentos con acompañamiento del equipo investigador y participación de la comunidad educativa, explicando la función del instrumento, la lectura correcta de las variables, aspectos de mantenimiento y las precauciones para evitar errores de registro.

Finalmente se socializará el formato de registro y se definirán responsabilidades básicas (frecuencia de lectura, encargados, cuidado de los instrumentos y reporte de novedades), dejando los instrumentos instalados y garantizando las condiciones mínimas para iniciar el seguimiento participativo.

Visitas de seguimiento

Tras la instalación de los instrumentos, la estrategia contempla dos visitas de seguimiento durante las primeras cuatro semanas de medición a las instituciones participantes. Estas no se

plantean como talleres, sino como acompañamientos técnicos para verificar el funcionamiento de los instrumentos, revisar la calidad de los registros y apoyar a los responsables del monitoreo.

Durante las visitas se verificará que los instrumentos permanezcan correctamente instalados, limpios, nivelados y libres de obstáculos, y se revisará el diligenciamiento de los formatos para identificar errores como datos incompletos, ausencia de fecha u hora, lecturas inconsistentes o dificultades en la interpretación de la escala del instrumento.

Además, estos espacios permitirán resolver dudas, reforzar las instrucciones de lectura y mantenimiento, y registrar observaciones que sirvan de insumo para ajustar los formatos, precisar responsabilidades y fortalecer la continuidad del proceso.

Taller 4. Análisis participativo de los datos y devolución de los resultados

Este taller se diseñó como un espacio para el análisis participativo y la devolución de la información recolectada durante el periodo inicial de monitoreo. Su planteamiento se fundamentó en experiencias que destacan la importancia de incorporar la interpretación colectiva, la validación comunitaria y la retroalimentación de resultados como etapas fundamentales del proceso, más allá de la simple recolección de datos (Cárdenas & Ortiz-Riomalo, 2018; Flórez-Yepes et al., 2025; Blanco-Ramírez et al., 2025). A diferencia de las visitas de seguimiento, centradas en la verificación técnica del registro, este taller se orientará a la construcción, interpretación y discusión participativa de los datos de precipitación, temperatura y humedad relativa, así como a su relación con el territorio.

Previo al taller, el equipo investigador consolidará los registros en una hoja de cálculo, revisando datos faltantes, valores atípicos o posibles errores de lectura. Con esta información se prepararán tablas base, plantillas gráficas y una guía breve de interpretación para que los estudiantes construyan sus propios gráficos durante la jornada. También se dispondrán materiales

para el mapa de relaciones, el buzón de mejoras y el cartel de devolución. La jornada, de 2 horas y media, se organizará en seis momentos.

Inicialmente, se realizará una bienvenida y una explicación básica sobre la dinámica del taller, la lectura de tablas y la construcción de gráficos sencillos. Luego, los estudiantes rotarán por tres estaciones temáticas: precipitación, temperatura y humedad relativa. En cada estación elaborarán un gráfico, identificarán máximos, mínimos, patrones, datos faltantes o inconsistencias, y registrarán sus observaciones en la guía de interpretación.

Posteriormente, los grupos socializarán los gráficos y hallazgos para construir conclusiones colectivas sobre la dinámica hidrológica observada. Esta discusión permitirá complementar la guía con preguntas y criterios útiles para futuros análisis. Además, se retomarán los resultados del Taller 1 para relacionar los datos monitoreados con las problemáticas hídricas, las fuentes de agua, el abastecimiento, las condiciones del territorio y los servicios hidrológicos.

Finalmente, mediante un buzón de mejoras, se recogerán observaciones sobre formatos, lecturas, instrumentos y organización del monitoreo. El taller concluirá con la elaboración colectiva de un cartel o póster que sintetice los principales hallazgos, su relación con el territorio y un mensaje para la comunidad educativa. Este producto, junto con los gráficos, la guía diligenciada y las conclusiones, será insumo para informes dirigidos a las instituciones educativas, los acueductos veredales, la CDMB, el amb y la Alcaldía de Tona, fortaleciendo la apropiación social de la información y el seguimiento participativo de las variables hidrológicas en la cuenca del río Tona.

El desarrollo operativo detallado de la estrategia se presenta en la cartilla metodológica incluida como Apéndice F. Esta cartilla reúne la etapa previa, los talleres participativos, las visitas de seguimiento, los formatos de registro, los materiales de apoyo y las guías necesarias para

orientar la futura implementación del monitoreo participativo de precipitación, temperatura y humedad relativa en la cuenca del río Tona.

3. Conclusiones

El presente trabajo de grado diseñó un proceso de monitoreo participativo de precipitación, temperatura y humedad relativa orientado a fortalecer la comprensión de los servicios hidrológicos en la cuenca alta del río Tona, estructurado como un diseño metodológico aplicado que, a través de tres fases encadenadas, proporciona un plan operativo para su implementación, tendiendo un puente entre los referentes teóricos y las realidades del territorio.

El análisis comparativo de once experiencias participativas en América Latina, África y Colombia permitió identificar metodologías, actores y niveles de participación para la cuenca del río Tona. Los procesos exitosos combinan ciencia ciudadana con conocimiento local, instrumentos de bajo costo y tecnologías accesibles, con énfasis en la formación y el empoderamiento comunitario como base de la estrategia.

La estrategia participativa se fundamenta en la articulación de actores clave del territorio, destacando a las instituciones educativas como nodos territoriales por su capacidad de convocatoria y arraigo comunitario, lo que las convierte en espacios idóneos para la formación ambiental y la construcción colectiva de conocimiento. El propósito es fortalecer las capacidades locales para el monitoreo de variables hidroclimáticas, generando información que permita comprender la dinámica hídrica del territorio y participar en la gestión del recurso hídrico.

Asimismo, la estrategia se estructura en cuatro talleres (lectura territorial, formación básica, instalación participativa de instrumentos y análisis de datos) y visitas de seguimiento, a partir de lecciones aprendidas previas, asegurando la comprensión integral de los servicios

hidrológicos, la capacidad de análisis local y la generación de información para la toma de decisiones, en coherencia con el marco normativo colombiano.

Además, el desarrollo de protocolos, instrumentos operativos, materiales didácticos y formatos de registro estandarizados constituye un producto técnico valioso que guía la implementación del monitoreo, fortaleciendo la capacidad local para recolectar, analizar y usar información hidroclimática, y contribuyendo a una gestión colaborativa e inclusiva del recurso hídrico en la cuenca.

Finalmente, este trabajo de grado entiende la participación como un proceso colaborativo en el que comunidades, instituciones y actores técnico-científicos intervienen en la recolección y análisis de información. Bajo esta definición, la estrategia diseñada para la cuenca del río Tona se ubica en un nivel intermedio: involucra a estudiantes e instituciones educativas en la formación, el registro y el análisis de datos, aunque la definición de variables y la planificación general quedaron a cargo del equipo investigador. Esto es coherente con los retos de sostener niveles de participación más profundos en etapas iniciales de procesos comunitarios y sugiere que el proceso podría avanzar hacia mayor apropiación comunitaria conforme se consolide.

4. Recomendaciones

Para una futura implementación, se recomienda ejecutar rigurosamente la etapa previa de selección institucional, aplicando los criterios y lista de chequeo diseñados para garantizar condiciones mínimas de acceso, conectividad y compromiso. Asimismo, debe comunicarse con claridad el propósito formativo del proceso, evitando que la comunidad educativa lo perciba como un instrumento de control o sanción, riesgo señalado por Cárdenas y Ortiz-Riomalo (2018) para el sistema Suratá, del cual la cuenca del río Tona hace parte.

Se recomienda validar la estrategia con los actores sociales de la cuenca (acueductos veredales, Juntas de Acción Comunal y comunidades rurales), incluyéndolos desde las primeras etapas e indagando percepciones y disposición de participación, de modo que la apropiación del proceso se construya y no se limite al ámbito educativo, en línea con el mapa de actores presentado. Para garantizar la calidad de los datos, se sugiere acompañamiento técnico presencial continuo en los primeros meses de operación, las visitas son clave para corregir errores y reforzar la motivación y el sentido de pertenencia. Conviene además prever un respaldo en formatos físicos y mantenimiento preventivo de los instrumentos, dado que experiencias en Ecuador, Tanzania y Sudáfrica evidenciaron conectividad limitada y los daños en los equipos pueden afectar la continuidad.

De igual forma, se recomienda articular el monitoreo con los sistemas de información y planificación local (POMCA, planes de acueductos veredales), fortaleciendo la gobernanza del agua y la efectividad de las políticas públicas.

Para asegurar la sostenibilidad del proceso, se recomienda priorizar la transferencia de capacidades a docentes y estudiantes líderes desde las primeras etapas, mediante materiales replicables y comunicación continua sobre el uso de los datos.

Finalmente, una vez consolidado el monitoreo de precipitación, temperatura y humedad relativa, se recomienda evaluar la expansión del proceso, incorporando otras variables (caudal, calidad del agua) y profundizando la vinculación de acueductos veredales y asociaciones de productores, de manera que su participación se traduzca en un involucramiento activo y no solo en un reconocimiento preliminar.

Referencias Bibliográficas

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (s. f.-a). Embalse. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (s. f.-b). Fuentes de agua. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (s. f.-c). Plantas de tratamiento. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- Alcaldía Municipal de Tona. (2000). Esquema de ordenamiento territorial del municipio de Tona: Resumen ejecutivo. Tona: Alcaldía Municipal de Tona.
- Alcaldía Municipal de Tona. (2004). Plan de desarrollo municipal 2004–2007: Tona, nuestro compromiso, con participación y equidad. Tona: Alcaldía Municipal de Tona.
- Anthropic. (2026). Claude (Modelo de lenguaje grande). Anthropic. <https://www.anthropic.com>
- Blanco-Ramírez, S., Bañales-Seguel, C., Guardado-Torrez, C., Seibert, J., & van Meerveld, I. (2025). Implementation of a global citizen science app in community-based water monitoring: Lessons learned from the CrowdWater experiences in Latin America. *Citizen Science: Theory and Practice*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.5334/cstp.749>
- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M. R., Ochoa-Tocachi, B. F., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A., & Mathez-Stiefel, S.-L. (2019). Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433, 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>

- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185–228.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
- Buckingham, K., Ray, S., Morales, A. G., Singh, R., Martin, D., Wicaksono, S., Chrysolite, H., Minnick, A., Johnston, L., & Arakwiye, B. (2018). Mapping social landscapes: A guide to identifying the networks, priorities, and values of restoration actors. Washington, D. C.: World Resources Institute.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 53–72.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A., & Célleri, R. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1247–1258.
<https://doi.org/10.5194/hess-14-1247-2010>
- Buytaert, W., Zulkafli, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T. C., Bastiaensen, J., De Bièvre, B., Bhusal, J., Clark, J., Dewulf, A., Foggin, M., Hannah, D. M., Hergarten, C., Isaeva, A., Karpouzoglou, T., Pandeya, B., Paudel, D., Sharma, K., Steenhuis, T., & Zhumanova, M. (2014). Citizen science in hydrology and water resources: Opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Frontiers in Earth Science*, 2.
<https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>
- Cárdenas, J. C., & Ortiz Riomalo, J. F. (2018). Acción colectiva para abordar conflictos socioambientales. Bogotá: Universidad de los Andes.

- Carvalho-Santos, C., Honrado, J. P., & Hein, L. (2014). Hydrological services and the role of forests: Conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale. *Ecological Complexity*, 20, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2014.09.001>
- Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., Moll-Rocek, J., Vieira, I. C. G., & Wilson, S. J. (2016). When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*, 45(5), 538–550. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0772-y>
- Cherif, I., Cherqui, F., Perret, F., Bourjaillat, B., Lord, L., Bertrand-Krajewski, J.-L., Walcker, N., Gisi, M., Bacot, L., & Navratil, O. (2025). LevelWAN: A cost-effective, open-source IoT system for water level monitoring in highly dynamic aquatic environments. *HardwareX*, 23, e00685. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2025.e00685>
- Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Bogotá: Congreso de Colombia.
- Conrad, C. C., & Hilchey, K. G. (2011). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: Issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1), 273–291. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1582-5>
- Contreras-Gómez, A. E. Y., & Muller-Rueda, H. (2021). Hoja de ruta metodológica para monitoreo comunitario. *Revista ITECKNE*, 18(1).
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (s. f.-a). Funciones y deberes. Bucaramanga: CDMB.
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (s. f.-b). Naturaleza jurídica. Bucaramanga: CDMB.
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2005). Plan de ordenamiento y manejo ambiental de la microcuenca río Tona. Bucaramanga: CDMB.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2016). Informe de gestión 2015. Bucaramanga: CDMB.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2022a, 17 de junio). CDMB avanza en la construcción del esquema de seguridad hídrica de la cuenca del río Tona. Bucaramanga: CDMB.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2023a, 18 de julio). El monitoreo participativo en la Unidad Hidrográfica río Tona da sus primeros resultados para alcanzar la gobernanza del agua en Santander. Bucaramanga: CDMB.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2023b, 27 de noviembre). La CDMB lideró el Encuentro de Saberes y Entenderes con los actores sociales de la Unidad Hidrográfica río Tona. Bucaramanga: CDMB.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2024b). Plan de Acción Cuatrienal 2024–2027. Bucaramanga: CDMB.

Danielsen, F., Burgess, N. D., Balmford, A., Donald, P. F., Funder, M., Jones, J. P. G., Alviola, P., Balet, D. S., Blomley, T., Brashares, J., Child, B., Enghoff, M., Fjeldsø, J., Holt, S., Hübertz, H., Jensen, A. E., Jensen, P. M., Massao, J., Mendoza, M. M., & Yonten, D. (2009). Local participation in natural resource monitoring: A characterization of approaches. *Conservation Biology*, 23(1), 31–42. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01063.x>

Datos Abiertos Colombia. (2026a). Directorio de establecimientos educativos oficiales y no oficiales. Bogotá: Datos Abiertos Colombia.

Datos Abiertos Colombia. (2026b). Establecimientos educativos de preescolar, básica y media. Bogotá: Datos Abiertos Colombia.

- Datos Abiertos Colombia. (2026c). Matrícula e información de instituciones educativas por municipio. Bogotá: Datos Abiertos Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (2014). Documento CONPES 3810. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.
- Flórez-Yepes, G. Y., Escobar-Osorio, M., Bermúdez-Piedrahita, J. M., & Vaca-López, A. (2025). Participatory monitoring for water management: A bibliometric analysis. *DYNA*, 92(235), 92–99. <https://doi.org/10.15446/dyna.v92n235.116426>
- Gheyret, G., Mohammad, A., & Tang, Z. (2020). Elevational patterns of temperature and humidity in the middle Tianshan Mountain area in Central Asia. *Journal of Mountain Science*, 17(2), 397–409. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5481-0>
- Google. (2026). Gemini (Modelo de lenguaje grande). Google. <https://gemini.google.com>
- Holguín, L., & Cusguen, L. (2021). Red de monitoreo comunitario del clima. Bogotá: Conservación Internacional Colombia.
- Hutchins, M., & Geist, V. (1987). Behavioural considerations in the management of mountain-dwelling ungulates. *Mountain Research & Development*, 7(2), 135–144. <https://doi.org/10.2307/3673307>
- IDEAM. (2012). Temperatura media anual y pisos térmicos 1971 - 2000. Año 2012. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://visualizador.ideam.gov.co/CatalogoObjetos/catalog/viewObjectIndex/13732539>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s. f.). Misión, visión, funciones y deberes. Bogotá: IDEAM.

- Kiesel, J., Guse, B., Pfannerstill, M., Kakouei, K., Jähnig, S. C., & Fohrer, N. (2017). Improving hydrological model optimization for riverine species. *Ecological Indicators*, 80, 376–385. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.032>
- Kongo, V. M., Kosgei, J. R., Jewitt, G. P. W., & Lorentz, S. A. (2010). Catchment monitoring through participation. Pietermaritzburg: University of KwaZulu-Natal.
- Makondo, C. C., & Thomas, D. S. G. (2018). Climate change adaptation: Linking indigenous knowledge with western science for effective adaptation. *Environmental Science & Policy*, 88, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.06.014>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington, D. C.: Island Press.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá: República de Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas - POMCAS*. Bogotá: República de Colombia.
- Ministerio de Educación Nacional. (1994). Decreto 1743 de 1994: Por el cual se instituye el Proyecto de Educación Ambiental para todos los niveles de educación formal, se fijan criterios para la promoción de la educación ambiental no formal e informal y se establecen los mecanismos de coordinación entre el Ministerio de Educación Nacional y el Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá: Ministerio de Educación Nacional.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Funciones Viceministerio de Agua*. Bogotá: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- OpenAI. (2026). ChatGPT (Modelo de lenguaje grande). OpenAI. <https://chat.openai.com>

- Pahl-Wostl, C., Sendzimir, J., Jeffrey, P., Aerts, J., Berkamp, G., & Cross, K. (2007). Managing change toward adaptive water management through social learning. *Ecology and Society*, 12(2). <https://doi.org/10.5751/ES-02147-120230>
- Perevochtchikova, M., & Sandoval-Romero, G. E. (2020). Monitoreo comunitario participativo del agua en la periferia suroeste de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, 103. <https://doi.org/10.14350/rig.60063>
- Pilz, D., Ballard, H. L., & Jones, E. T. (2006). Broadening participation in biological monitoring: Handbook for scientists and managers. Portland: USDA Forest Service.
- Presidencia de la República de Colombia. (2012, 13 de agosto). Decreto 1640 de 2012. Bogotá: Presidencia de la República de Colombia.
- Presidencia de la República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015. Bogotá: Presidencia de la República de Colombia.
- QGIS.org. (2026). QGIS Geographic Information System. QGIS Association.
- Tefera, G. W., Ray, R. L., & Bantider, A. (2024). Exploring the unique biophysical characteristics and ecosystem services of mountains: A review. *Journal of Mountain Science*, 21(11), 3584–3597. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8828-0>
- Universidad Industrial de Santander. (s. f.-a). Grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Varis, O., Kajander, T., & Lemmelä, R. (2004). Climate and water: From climate models to water resources management and vice versa. *Climatic Change*, 66(3), 321–344. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000044622.42657.d4>

Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43(7), 2006WR005653. <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>

Zeballos, J. C., Valencia, J., Codalli, F., Mitze, F., Shagega, F., Weeser, B., & Jacobs, S. (2025). Participatory monitoring evaluation. Quito: Autor.

Apéndices

Apéndice A. Caracterización geográfica y altitudinal de las experiencias de monitoreo participativo revisadas

Tabla 1. Caracterización geográfica y altitudinal de las experiencias de monitoreo participativo revisadas

CONTINENTE	PAÍS	ZONA	ALTITUD (M.S.N.M)	Cita
América del Sur	Ecuador	Cajas National Park y tomebamba	3300 – 4450	Campos Zeballos et al. 2025
América del Sur	Colombia	Santander: municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón	959- 925- 777	Contreras-Gómez y Muller-Rueda, 2021
América del Sur	Colombia; Santander y Norte de Santander	Cuencas Surata, Zulia y Pamplonita; conexión con Bucaramanga y Cúcuta	500 – 3500	Cárdenas y Ortiz-Riomalo, 2018
América del Sur	Colombia	Cuenca del río Chinchiná	800 – 3600	Flórez-Yepes et al., 2025
América del Sur	Colombia	Cuenca del río Negro	514–1093	Zuluaga Restrepo y Perea Tamayo, 2020
América del Sur	Brasil	Río Pardo, Minas Gerais (montaña)	500 – 1200	Blanco-Ramírez et al., 2025
América Central y Caribe	Honduras	Cacique Lempira Reserve y Santa Rosa de Copán	1000–2849	Campos Zeballos et al., 2025

CONTINENTE	PAÍS	ZONA	ALTITUD (M.S.N.M)	Cita
América Central y Caribe	Costa Rica	Corredor Biológico Interurbano María Aguilar, San José	1000 – 1200	Blanco-Ramírez et al., 2025
América Central y Caribe	El Salvador	El Zonte	0 – 50	Blanco-Ramírez et al., 2025
América Central y Caribe	Guatemala	Río Los Esclavos (montaña)	300 – 1500	Blanco-Ramírez et al., 2025
América del Norte	México	Periferia suroeste de la Ciudad de México	2200 – 3900	Perevochtchikova y Sandoval-Romero, 2020
América del Norte	México	comunidades de la Sierra Juárez, estado de Oaxaca	1000 – 3200	Cosmes-Guzmán et al., 2024
África	Tanzania	Kilimanjaro National Park	1800 – 5895	Campos Zeballos et al., 2025
África	Tanzania	cuenca del río Wami	0 – 1000	Ndomba et al., 2010
África	Tanzania	Río Ngerengerey río Ruvu, Morongo.	200 – 600	Gomani et al., 2010
África (Sur)	Sudáfrica	Cuenca de Potshini y cuenca del río Thukela	1000 – 3400	Kongo et al., 2010

Nota: Elaboración propia con base en Zeballos et al. (2025), Contreras-Gómez y Muller-Rueda (2021), Cárdenas y Ortiz-Riomalo (2018), Flórez-Yepes et al. (2025), Zuluaga Restrepo y Perea Tamayo (2020), Blanco-Ramírez et al. (2025), Perevochtchikova y Sandoval-Romero (2020), Cosmes-Guzmán et al. (2024), Gomani et al. (2010), Ndomba et al. (2010) y Kongo et al. (2010).

Apéndice B. Actores institucionales relacionados con la gestión hídrica y el monitoreo participativo en la cuenca del río Tona

Tabla 2. Actores institucionales relacionados con la gestión hídrica y el monitoreo participativo en la cuenca del río Tona

NIVEL	ENTIDAD	ROL INSTITUCIONAL	FUNCIONES CLAVE	RELACIÓN CON EL RECURSO HÍDRICO	APORTE AL MONITOREO PARTICIPATIVO
Nacional	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)	Autoridad ambiental nacional	Formula políticas, regula el uso de recursos naturales, coordina el SINA	Define lineamientos de gestión integral del recurso hídrico	Proporciona el marco normativo y político para implementar estrategias de monitoreo
Nacional	IDEAM	Entidad técnica nacional	Genera, analiza y divulga información hidrológica y climática; opera redes de monitoreo	Produce información sobre oferta hídrica y condiciones climáticas	Referente metodológico y técnico para sistemas de monitoreo
Nacional	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT)	Entidad de política sectorial	Formula políticas de agua potable y saneamiento; coordina servicios públicos	Regula el acceso y prestación del servicio de agua	Vincula el monitoreo con la gestión de servicios y abastecimiento
Regional	CDMB	Autoridad ambiental regional	Administra recursos naturales, otorga permisos, ejecuta políticas ambientales	Gestiona y protege cuencas en su jurisdicción	Actor clave para implementar y validar procesos de monitoreo en la cuenca
Local	Alcaldía de Tona	Autoridad territorial local	Planifica el desarrollo municipal, regula uso del suelo, promueve participación	Incide en la gestión del territorio y recursos naturales locales	Facilita la articulación comunitaria y la gobernanza local del monitoreo
Local	Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB)	Prestador de servicios públicos	Captación, tratamiento y distribución de agua potable; control de calidad	Depende directamente del río Tona como fuente de abastecimiento	Interesado en el monitoreo para garantizar calidad y sostenibilidad del recurso

Académico	Universidad Industrial de Santander (UIS)	Actor técnico y académico	Investigación, formación y extensión en recursos hídricos	Genera conocimiento sobre oferta, calidad y gestión del agua	Apoya metodológicamente el diseño y análisis del monitoreo
Cooperación / ONG	Conservación Internacional / GEF Alta Montaña	Actor de cooperación técnica	Implementa proyectos de conservación, adaptación climática y ciencia comunitaria	Trabaja en regulación hídrica y ecosistemas de montaña	Referente en metodologías participativas y monitoreo comunitario

Nota: Elaboración propia con base en Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2010), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (s. f.), Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021), Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (s. f.-a, s. f.-b, 2024b), Alcaldía Municipal de Tona (2000, 2004), Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (s. f.-b, s. f.-c), Universidad Industrial de Santander (s. f.-a) y Holguín y Cusguen (2021).

Apéndice C. Instrumentos normativos y de política pública relacionados con la gestión hídrica y el monitoreo participativo

Tabla 3. Instrumentos normativos y de política pública relacionados con la gestión hídrica y el monitoreo participativo

Instrumento	Tipo	Año	Alcance	Contenido clave	Relación con el recurso hídrico	Aporte al monitoreo participativo
Ley 99 de 1993	Ley	1993	Nacional	Crea el Ministerio de Ambiente y el SINA; organiza la gestión ambiental	Establece la estructura institucional para la gestión del agua	Define el marco institucional donde se desarrollan procesos de monitoreo

Instrumento	Tipo	Año	Alcance	Contenido clave	Relación con el recurso hídrico	Aporte al monitoreo participativo
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH)	Política pública	2010	Nacional	Promueve gestión sostenible del agua, articulada al territorio y ecosistemas	Integra planificación, conservación y uso del recurso hídrico	Incorpora participación, gobernanza y gestión comunitaria como ejes clave
Decreto 1640 de 2012	Decreto	2012	Nacional	Reglamenta ordenación y manejo de cuencas (POMCA), monitoreo y evaluación del agua	Define instrumentos de planificación y seguimiento del recurso hídrico	Vincula el monitoreo con procesos formales de gestión de cuencas
Decreto 1076 de 2015	Decreto único reglamentario	2015	Nacional	Compila la normativa ambiental del sector	Regula integralmente la gestión ambiental y del agua	Proporciona el marco regulatorio general para acciones de monitoreo
CONPES 3810 de 2014	Documento de política	2014	Nacional	Lineamientos para agua potable y saneamiento en zonas rurales	Relaciona la gestión del agua con prestación del servicio	Apoya procesos comunitarios en contextos rurales (uso complementario)
Pago por Servicios Ambientales (PSA) – Decreto 870 de 2017 y Decreto 1007 de 2018	Decreto / instrumento económico	2017–2018	Nacional	Establece incentivos para conservación, restauración y manejo sostenible; exige seguimiento de acuerdos	Relaciona la conservación de ecosistemas con la provisión de servicios hidrológicos	Incorpora explícitamente monitoreo participativo, verificación comunitaria y seguimiento de resultados ambientales

Nota: Elaboración propia con base en Congreso de Colombia (1993), Ministerio de Ambiente y

Desarrollo Sostenible (2010), Presidencia de la República de Colombia (2012), Presidencia de la

República de Colombia (2015), Departamento Nacional de Planeación (2014) y Ministerio de

Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021).

La Figura 4 presenta la distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas y las concesiones de agua en la cuenca del río Tona, lo cual permite identificar las zonas con mayor demanda del recurso hídrico y los puntos existentes para su monitoreo.

[illegible]

Nota: Elaboración propia con base en cartografía proporcionada por Moreno, comunicación personal, 2026, y procesamiento en QGIS.

Apéndice E. Ruta general de la estrategia participativa

La Figura 5 presenta la ruta general de la estrategia participativa, organizada en una etapa previa y cuatro talleres orientados al reconocimiento del territorio, la formación en variables hidroclimáticas, la instalación de instrumentos y la devolución participativa de resultados.

Figura 5. Secuencia de actividades orientados a la comprensión de los servicios hidrológicos en la cuenca del río Tona.



Nota: Elaboración propia.

Apéndice F. Cartilla metodológica para la implementación del monitoreo participativo de variables hidroclimáticas en la cuenca del río Tona

Nota: la cartilla metodológica se adjunta como documento independiente en el siguiente enlace

de acceso directo: <https://canva.link/giraldo-lara-ramirez-1>