

**Diseño de un sistema de captación y tratamiento primario de aguas lluvia, de bajo costo,
para la vereda Garibay del municipio de Togüí (Boyacá, Colombia).**

Sneider Nicolas Robles Porras

Juan David Bustos Moyano

Juanita Quintero Castro

Docente: Marie Jose Chery Leal

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Proyecto de Grado

Bogotá, Colombia

2025

Resumen

La vereda Garibay (Togüí, Boyacá, Colombia) enfrenta vulnerabilidad hídrica asociada a: dependencia de fuentes superficiales con fluctuación estacional y episodios de turbidez elevada; cloración irregular y ausencia de control sistemático de calidad; racionamientos durante periodos secos intensificados por eventos El Niño; y limitaciones técnico-organizativas para el mantenimiento de los acueductos veredales. A pesar de un régimen bimodal de lluvias y precipitaciones anuales suficientes para cubrir la fracción estrictamente potable de la demanda doméstica, el agua lluvia permanece subutilizada. Este proyecto tiene como objetivo general diseñar un sistema modular, de bajo costo, de captación, almacenamiento y tratamiento multibarrera de agua lluvia para una vivienda representativa de la vereda, garantizando el cumplimiento de la Resolución 2115 de 2007 y criterios de operación comunitaria sostenible.

Palabras clave: aguas lluvia, rural, sistema de tratamiento, bajo costo.

Introducción

La disponibilidad de agua segura e inocua es un pilar de salud pública, productividad y resiliencia climática, pero persisten brechas críticas en áreas rurales donde la cobertura y la calidad están por debajo de los promedios nacionales (WHO/UNICEF JMP, 2023; UN-Water, 2024). En Colombia, aunque las cabeceras municipales alcanzan altos niveles de acceso, amplios segmentos rurales todavía dependen de fuentes vulnerables a contaminación y estacionalidad (MinVivienda, 2023; Conpes 4033, 2021). El Departamento de Boyacá refleja esta dualidad: infraestructura relativamente consolidada en núcleos urbanos frente a desafíos operativos y de continuidad en zonas rurales como la vereda Garibay, jurisdicción del municipio de Togüí (PDA Boyacá, 2023; Superservicios, 2023). La variabilidad climática reciente asociada a episodios de El Niño ha intensificado presiones sobre caudales base y estabilidad del suministro (IDEAM, 2024). Además, indicadores sanitarios relacionados con el agua, como los eventos de Enfermedad Diarreica Aguda, mantienen correlación con interrupciones y deficiencias de desinfección en sistemas pequeños (INS, 2023). “La prestación del servicio en zonas rurales enfrenta limitaciones de capacidad técnica” (Conpes 4033, 2021) que se traducen en riesgos preventivos no mitigados. Así, el contexto global solo sirve aquí como telón que subraya la urgencia local de soluciones adaptadas, sostenibles y comunitariamente gestionables en Garibay.

En Garibay la problemática específica se manifiesta en una dependencia de captaciones superficiales y/o manantiales con marcada fluctuación estacional, tratamientos simplificados y cloración irregular en tramos distales de la red, generando vulnerabilidad microbiológica (INS, 2023; Superservicios, 2023). Las variaciones de turbidez tras lluvias intensas elevan la demanda de coagulantes, lo cual excede a veces la capacidad operativa local (MinVivienda, 2023). La continuidad intermitente (horas servicio/día variables) induce prácticas domésticas de almacenamiento que elevan el riesgo de recontaminación (PDA

Boyacá, 2023; Conpes 4033, 2021). Déficits de micromedición y estructuras tarifarias por debajo del costo real restringen el mantenimiento preventivo y la reposición de insumos críticos (Superservicios, 2023; DNP, 2023). Eventos secos recientes redujeron caudales base y forzaron racionamientos parciales, ampliando tiempos de acarreo y cargas de trabajo doméstico, especialmente para mujeres y jóvenes (IDEAM, 2024; WASHDev, 2024). Este escenario incrementa la exposición a agentes patógenos y perpetúa ciclos de afectación económica y sanitaria (INS, 2023; MDPI Water, 2024). Sin intervención, la combinación de estacionalidad climática y limitaciones de gestión comunitaria perpetúa un círculo de vulnerabilidad hídrica y social.

Ante esta realidad, el aprovechamiento de aguas lluvias emerge como alternativa estratégica complementaria al abastecimiento convencional, con precipitaciones anuales de 1.600–1.700 mm (IDEAM, 2022; ENA, 2022), la captación de aguas lluvias a escala de vivienda o núcleo agroproductivo puede reducir la presión en estiaje, amortiguar picos de demanda y aumentar la resiliencia ante interrupciones (MinVivienda, 2023; FAO, 2023). Evidencia y lineamientos recientes muestran que sistemas con prefiltrado, primeras aguas y almacenamiento protegido son viables y escalables en zonas rurales andinas (MinVivienda, 2022; Conpes 4033, 2021). “La cosecha de lluvia constituye una medida de adaptación climática de bajo costo y alta replicabilidad” (MinAmbiente, 2023). Integrar redes formales con soluciones descentralizadas fortalece la seguridad hídrica y reduce riesgos sanitarios (UNICEF, 2023; WHO, 2023). En Garibay, el potencial pluvial frente a la demanda básica permitiría cubrir con holgura periodos secos si se dimensiona bien el almacenamiento (IDEAM, 2022; MinVivienda, 2023), transformando la lluvia en un activo hídrico gestionable.

No obstante, captar no equivale a garantizar potabilidad: la inocuidad exige procesos de tratamiento y control conforme a la normativa sanitaria vigente (Resolución 2115, 2007; INS, 2023). La variabilidad de calidad inicial (material particulado, materia orgánica disuelta, contaminantes atmosféricos) requiere un tren mínimo: rejilla, derivador de primeras lluvias, sedimentación/filtración simple y desinfección final (MinVivienda, 2023; WHO, 2023). La

aplicación sistemática de cloración o tecnologías complementarias (p.ej., UV en baja turbidez) sustenta la reducción de riesgo microbiológico (WHO/UNICEF JMP, 2023). “El aseguramiento de la calidad demanda monitoreo rutinario de cloro residual y verificación microbiológica” (INS, 2023). Además, la integración de planes de gestión del riesgo del agua (PGRA) fortalece la anticipación a eventos extremos y la trazabilidad operativa (Conpes 4033, 2021; Superservicios, 2023). El componente formativo para operadores comunitarios es crítico para sostener desempeño en el tiempo y alinear prácticas con estándares nacionales e internacionales (MDPI Water, 2024; WASHDev, 2024). Así, el diseño técnico debe ser inseparable de un modelo de gobernanza y mantenimiento realista.

En consecuencia, este proyecto se orienta a diseñar una solución integral de captación, almacenamiento, tratamiento y gestión comunitaria de agua lluvia adaptada a las condiciones agroclimáticas y socioorganizativas de Garibay, contribuyendo a cerrar brechas de calidad, continuidad y resiliencia (PDA Boyacá, 2023; IDEAM, 2024). La propuesta busca optimizar el balance hídrico doméstico, disminuir exposición a contaminantes microbiológicos y reducir la dependencia crítica de una única fuente superficial vulnerable a sequías cortas (INS, 2023; ENA 2022). Asimismo, se alinea con metas nacionales y globales de acceso seguro y gestión sostenible del recurso (UN-Water, 2024; WHO/UNICEF JMP, 2023), incorporando criterios de eficiencia operativa y costo–beneficio social (DNP, 2023; MinVivienda, 2023). “El fortalecimiento comunitario es un eje de sostenibilidad a largo plazo” (WASHDev, 2024). El resultado esperado es un modelo replicable que articule innovación técnica apropiada, gobernanza local y cumplimiento normativo, generando impactos positivos en salud pública, productividad familiar y adaptación climática (Conpes 4033, 2021; MDPI Water, 2024). De esta manera, la captación de aguas lluvias deja de ser un recurso subutilizado y se consolida como eje estratégico del bienestar hídrico de la comunidad.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de captación y tratamiento de aguas lluvias de bajo costo, para una vivienda en la vereda Garibay del municipio de Togüí (Boyacá, Colombia).

Objetivos Específicos

1. Identificar los parámetros de calidad críticos del agua lluvia recolectada en la vivienda seleccionada de la vereda Garibay y los requisitos de tratamiento exigidos por la normativa colombiana para su potabilización.
2. Diagnosticar las condiciones técnicas y ambientales para la captación de aguas lluvias en la vivienda objeto de estudio, mediante la caracterización de la precipitación local, el análisis de la superficie de captación y la evaluación de la calidad inicial del agua lluvia.
3. Diseñar el sistema de tratamiento dimensionando sus componentes para asegurar que el agua tratada cumpla con los parámetros de calidad identificados, priorizando la eficiencia, el bajo costo y el fácil mantenimiento
4. Determinar la viabilidad económica y financiera del sistema de tratamiento implementado.

Definición del problema

La vereda Garibay ubicada en la zona rural del municipio de Togüí (Boyacá), enfrenta una situación hídrica que se caracteriza por la combinación de un acceso limitado a agua potable segura, la variabilidad climática estacional marcada de la zona y las debilidades estructurales en la gestión comunitaria del abastecimiento (Superservicios, 2023). Togüí se caracteriza por tener una hidrografía abundante, es una región con alta precipitación lluviosa y cuenta con ríos importantes como el río Uvaza y Pescadero. Del mismo modo, cuenta con una de las quebradas más importantes del municipio: el Cacharro, la cual, se caracteriza por ser la fuente principal de suministro de agua. Sin embargo, en el sector rural se encuentran diferentes acueductos veredales construidos parcialmente los cuales captan el agua de diferentes sectores mediante sistemas rudimentarios de abastecimiento para consumo humano, este recurso hídrico llega a las viviendas en condiciones poco óptimas, sin cumplir los estándares de calidad para agua potable (Gobernación de Boyacá, 2013).

De acuerdo con la Alcaldía Municipal de Togüí (2024), el municipio presenta un total de cobertura en servicios de acueducto y alcantarillado de 43,28% para el año 2021. En este caso, solo la cobertura en acueducto es del 46,46% para el año 2021, sin embargo, este porcentaje ha disminuido con el tiempo, ya que para el año 2017 la cobertura en el municipio era del 46,72%. Por esta razón, es evidente que la vereda cuenta con una deficiencia en los servicios públicos, generando una inestabilidad social por no contar con servicios fundamentales para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes.

Por lo anterior, Garibay se enfrenta a un riesgo y estrés hídrico recurrente en territorios rurales. Este conjunto de factores demuestra el actual escenario que viven los habitantes de Togüí, una realidad llena de vulnerabilidad sanitaria y social. Según el índice de

riesgo de la calidad del agua para consumo humano, el cual hace referencia al grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el incumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua potable. Este índice clasifica entre 35.1 y 80% un nivel de riesgo alto. En este caso, el municipio alcanzó un indicador de 36,82% lo que clasifica a Togüi en riesgo alto de desarrollo de enfermedades (Gobernación de Boyacá, 2020).

La calidad del agua distribuida presenta incertidumbres y episodios de deterioro asociados a incrementos de turbidez en eventos de lluvia intensa y a la ausencia de un tratamiento completo y estable que asegure remoción de partículas y desinfección homogénea en todos los puntos de la red (Min Vivienda, 2023). Asegurar la calidad del agua requiere hacer monitoreos periódicos del cloro residual y comprobar su inocuidad mediante verificaciones microbiológicas. (INS, 2023), práctica que en los pequeños acueductos rurales suele ejecutarse de manera esporádica, generando el desarrollo de enfermedades gastrointestinales por parte de los habitantes. Los informes sanitarios nacionales señalan que la Enfermedad Diarreica Aguda continúa vinculada a deficiencias de desinfección en sistemas dispersos (Superservicios, 2023). Por esta razón, la inseguridad en la calidad del agua consumida por los habitantes de Togüi se consolida como núcleo del problema.

El régimen climático de la región andina de Boyacá presenta dos periodos secos puntuales: diciembre – febrero y junio – agosto, cada uno con una duración media de tres meses (IDEAM, 2023, p. 16). En años con influencia del fenómeno natural conocido como El Niño, caracterizado por una fuerte disminución de la actividad pluvial, se han observado déficits de precipitación estacional que alcanzan reducciones de hasta un 0% a un 40% del volumen nominal anual (2150 a 2450mm) (IDEAM, 2024, p.11), lo que intensifica la

disminución de caudales base. El cambio climático está haciendo más intensos y frecuentes los eventos extremos, como huracanes, tormentas tropicales, sequías prolongadas e inundaciones afirma el IDEAM, lo que implica una agudización en la intermitencia de fuentes hídricas clave en áreas rurales (IDEAM, 2023).

La irregularidad de aportes durante los meses secos compromete la planificación comunitaria de volúmenes, forzando decisiones reactivas y priorización de usos domésticos básicos en detrimento de necesidades productivas menores (Ortiz et al., 2021) La ausencia de reservas estratégicas suficientes expone a la comunidad a racionamientos no programados y a la concentración de la demanda en horarios específicos, agravando pérdidas y conexiones clandestinas (Ortiz et al., 2021). Adicionalmente, la reducción de caudales incrementa la vulnerabilidad a contaminación puntual por arrastre superficial cuando ocurren lluvias concentradas al inicio de las transiciones estacionales. Así se profundiza un ciclo de inseguridad hídrica vinculada a la estacionalidad climática (Maykot, Martins Vaz, & Ghisi, 2025).

En el plano socioeconómico, la limitada resiliencia del sistema de abastecimiento de zonas rurales en Latinoamérica, como Garibay, repercute en la salud pública, en la productividad agropecuaria de pequeña escala y en los costos de oportunidad de los hogares (IDEAM, 2023). Los sistemas rurales dispersos tienden a enfrentar más riesgos de interrupciones y problemas de calidad debido a limitaciones en su capacidad técnica y financiera (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023), situación que se refleja en rezagos de mantenimiento y en respuestas tardías ante fallas. La exposición repetida a agua de calidad desconocida aumenta la probabilidad de enfermedades entéricas, generando gastos médicos directos y pérdidas de ingreso por días no laborados (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023). La sobrecarga de tareas domésticas relacionadas con la búsqueda y almacenamiento de agua recae con frecuencia en mujeres y jóvenes, ampliando brechas de género productivo

y educativo. La ausencia de datos sistemáticos de calidad y continuidad limita la articulación con programas institucionales de apoyo técnico (Prüss-Ustün et al., 2019). La vulnerabilidad estructural del servicio, aún en periodos sin eventos climáticos extremos, indica una fragilidad de base que se agrava bajo condiciones de sequía estacional (IDEAM, 2024). Esta convergencia de factores técnicos, climáticos y socio organizativos consolida un problema público de inseguridad hídrica que afecta directamente el bienestar y la salud de la población. En síntesis, la comunidad enfrenta un déficit persistente de garantía en disponibilidad, regularidad y calidad del agua apta para consumo humano.

Justificación

La problemática de disponibilidad de agua segura para la comunidad rural exige una intervención que no dependa de ampliaciones costosas de infraestructura centralizada ni de fuentes explotadas; en este contexto, la implementación de un sistema integral de captación y tratamiento de aguas lluvias (componentes: techado optimizado, canalización, unidad de primera descarga, almacenamiento modular, filtración multietapa y desinfección final) surge como la solución más adecuada y viable.

Este enfoque se alinea con las recomendaciones de adaptación descentralizada propuestas por organismos internacionales que señalan la cosecha de lluvia como medida robusta de gestión del riesgo climático y seguridad hídrica (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2023). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2020) y los programas de resiliencia hídrica, la captación pluvial fortalece medios de vida al diversificar fuentes y reducir vulnerabilidad estacional. La evidencia técnica demuestra que el tratamiento *in situ* con trenes sencillos

(filtración + desinfección) cumple parámetros de potabilidad cuando se aplican buenas prácticas de operación (World Health Organization [WHO], 2022). Además, la modularidad permite escalar almacenamiento según demanda y estacionalidad bimodal documentada para la zona (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2017, 2023), optimizando volúmenes útiles y reduciendo pérdidas.

Mientras alternativas como camiones cisterna, pozos someros en acuíferos de baja recarga o derivaciones de redes distantes presentan altos costos recurrentes, retrasos regulatorios y mayor huella de carbono (World Bank, 2022), el sistema pluvial reduce costos de ciclo de vida y dependencia externa (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF], 2021; FAO, 2020). Adicionalmente, la solución propuesta no solo ofrece abastecimiento confiable, sino que incorpora criterios de economía circular al aprovechar un flujo hídrico local subutilizado, disminuyendo presión sobre fuentes superficiales y subterráneas (International Water Association [IWA], 2021).

Según la WHO (2022) y el Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua, Saneamiento e Higiene [JMP] (2023), la mejora de calidad en el punto de uso combinada con protección de la fuente es clave para cerrar brechas rurales de agua segura; el sistema integra barreras múltiples (captación limpia, primera descarga, filtración, desinfección) que reducen turbidez y riesgos microbiológicos, facilitando cumplimiento normativo. La segunda temporada lluviosa y el patrón bimodal permiten una estrategia de balance anual con volúmenes calculados sobre rangos estacionales documentados (IDEAM, 2017, 2023), lo que hace técnica y económicamente factible lograr autonomía operativa durante los periodos de menor precipitación mediante un dimensionamiento correcto de tanques, tal como recomiendan las guías de diseño para climas variables (WHO, 2022).

Otras alternativas técnicamente posibles (plantas centralizadas ampliadas, trasvases) enfrentan barreras de inversión, tiempo de implementación y menor adaptabilidad comunitaria (UNESCO, 2023; IPCC, 2022). En cambio, la captación y tratamiento de lluvia empodera a la comunidad en operación y mantenimiento, fortalece gobernanza local y se integra con programas de seguridad alimentaria mediante uso de excedentes para riego protegido (FAO, 2020; The World Bank, 2018).

Por tanto, dadas las restricciones de costo, oportunidad temporal, huella ambiental, resiliencia climática y control comunitario, esta alternativa no solo es la mejor, sino que se configura en la única solución integral que satisface simultáneamente criterios de sostenibilidad, resiliencia, calidad y asequibilidad (IPCC, 2022; WHO, 2022; UNICEF, 2021).

Análisis de Requerimientos

Entregables del Proyecto

1. Prototipo conceptual y de ingeniería básica de un sistema modular de captación y tratamiento de agua lluvia adaptado a la vivienda seleccionada (planos, cálculos, especificaciones y protocolo de operación y mantenimiento).
2. Informe de análisis de calidad de agua antes del tratamiento (caracterización de agua cruda/escorrentía de cubierta).
3. Informe de análisis de calidad de agua después del tratamiento (resultados comparados contra metas para usos no potables).

4. Análisis costo-beneficio del sistema terminado (CAPEX, OPEX, ahorros proyectado, indicadores financieros y ambientales, retorno de inversión).

Alcance y Delimitación

1. Unidad de intervención: Vivienda unifamiliar en Garibay, Togüí (Boyacá, Colombia).
2. Usos objetivos del agua tratada: consumo y cocina
3. Nivel de detalle del prototipo: ingeniería básica (no incluye diseños estructurales detallados de refuerzo de cubierta ni planos arquitectónicos completos)

Requerimientos Funcionales

1. Captar el agua lluvia de las ciertas disponibles mediante bajantes existentes o adaptadas.
2. Facilitar el desmontaje de cada etapa de tratamiento en caso de requerir mantenimiento.
3. Facilitar monitoreo básico in situ (accesos y puntos de muestreo).

Requerimientos de Desempeño

1. Eficiencia neta de captación superior al 70% (volumen aprovechado/ volumen potencial aprovechable)
2. Cumplimiento con normativa nacional relacionada al tratamiento de aguas potables (Resolución 2115 de 2007).

3. Periodo de recuperación de inversión inicial menor a 2 años.

Marco Teórico

El recurso hídrico y su gestión en el contexto rural colombiano

El agua es el recurso más valioso para los seres humanos y el planeta. Se caracteriza por ser la base de la vida y el desarrollo económico, ambiental y humano. Su disponibilidad determina la supervivencia de la raza humana, la biodiversidad, la salud de los ecosistemas, la producción agrícola, la generación de energía, el bienestar y el desarrollo de las sociedades (Banco Mundial, s.f.). De acuerdo con el Fondo Mundial para la Naturaleza o WWF por sus siglas en inglés, aunque el 70% de la superficie del planeta es agua, solo el 2,5% es agua dulce y menos del 1% está disponible para el consumo humano. Es por esto que, en el contexto urbano, el acceso seguro al recurso hídrico tiene una importancia estratégica debido a que en las grandes ciudades se encuentra gran parte de la población mundial, lo que genera un reto constante por la demanda intensiva y la presión sobre las fuentes de abastecimiento para poder suplir las necesidades básicas de la sociedad.

En Colombia, existen diversos ecosistemas como los ríos, embalses, páramos, lagunas y acuíferos subterráneos, los cuales representan la riqueza hídrica del país. Este país cuenta con ecosistemas de gran importancia como los páramos, que actúan como reguladores naturales, almacenando y liberando agua de manera gradual mientras alimentan los sistemas de abastecimiento de las principales ciudades como Bogotá (Acueducto, s.f.). A pesar de que Colombia es considerada una potencia hídrica mundial, gracias al crecimiento demográfico, la expansión de la infraestructura, la contaminación de las matrices ambientales y el cambio

climático se ha generado un aumento en la presión sobre los sistemas de abastecimiento, generando escenarios de vulnerabilidad, riesgo, inseguridad y estrés hídrico.

La gestión sostenible y seguridad de este recurso en entornos urbanos implica diversos esfuerzos, desde la protección de las fuentes naturales y los ecosistemas hasta la optimización en su uso, la diversificación de alternativas de abastecimiento y la incorporación de tecnologías que permitan enfrentar los desafíos de estrés hídrico al que se enfrenta la sociedad actual. En este sentido, la captación y tratamiento de aguas lluvias en ciudades como Bogotá caracterizada por sus precipitaciones, surge como una estrategia complementaria, capaz de reducir la dependencia de los sistemas tradicionales y fortalecer la resiliencia hídrica en las ciudades principales del país.

Cambio climático, variabilidad climática y vulnerabilidad hídrica

El acceso y la disponibilidad de este recurso tan fundamental para la vida, se ve influenciado y afectado por una problemática global que genera consecuencias sociales, ambientales, económicas y políticas en todas las partes del mundo: El cambio climático. De acuerdo con las Naciones Unidas (s.f.) el cambio climático hace referencia al cambio de las temperaturas y los patrones climáticos a largo plazo, estos cambios pueden ser naturales y antropogénicos. En este caso, las actividades humanas son la principal razón del aumento de la temperatura en el planeta debido a actividades como la quema de combustibles fósiles, lo que genera gases de efecto invernadero. El aumento de la temperatura produce una serie de efectos como el desarrollo de incendios forestales, el aumento del nivel del mar, el deshielo de los polos, sequías intensas, la disminución de la biodiversidad y la escasez de agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Es importante resaltar que, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) asegura en el informe sobre el cambio climático que el calentamiento global en curso seguirá

intensificando el ciclo hidrológico a nivel mundial, aumentando su variabilidad, alterando las precipitaciones y agravando la severidad de eventos tanto húmedos como secos (IPCC, 2021)

Del mismo modo, existe un fenómeno que está interrelacionado con el cambio climático y es la variabilidad climática. De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (s.f.) la variabilidad climática hace referencia a las fluctuaciones que ocurren en una región. Esta variabilidad se manifiesta en el desarrollo de fenómenos extremos, es decir, temporadas de lluvia y sequía intensas las cuales intervienen y dificultan la planificación y el manejo eficiente del recurso hídrico. En Colombia, la variabilidad climática se evidencia por medio de los fenómenos de El Niño y La Niña, puesto que, son dos fenómenos extremos opuestos derivados de una misma interacción aire-mar que pueden transformar radicalmente la disponibilidad de agua en el país. Para empezar, es importante aclarar que el océano Pacífico es uno de los principales factores que influye en estos fenómenos, teniendo en cuenta que, cuando la temperatura del Océano está en condiciones cálidas ocurre el fenómeno de El Niño, mientras que, cuando la temperatura del océano está en condiciones frías se desarrolla el fenómeno de La Niña (IDEAM, s.f)

Por una parte, el fenómeno de El Niño suele provocar periodos de sequía prolongada, disminución de las precipitaciones. Al perturbar los regímenes de precipitaciones y temperaturas, puede generar consecuencias en la agricultura, la seguridad alimentaria y, además, disminuye significativamente el caudal de los ríos y los embalses (FAO, s.f.) Por el contrario, el fenómeno de La Niña aumenta las precipitaciones, lo que contribuye al riesgo de inundaciones, desbordamientos, afectaciones en la infraestructura urbana, el desarrollo de problemas sociales, además ocasiona un descenso en la temperatura (National Geographic, 2024) Por lo anterior, ambos fenómenos evidencian la vulnerabilidad hídrica de las ciudades, la susceptibilidad de la población, ecosistemas y los sistemas de abastecimiento a sufrir posibles impactos negativos por la escasez, contaminación y variabilidad del recurso hídrico.

Actualmente la seguridad hídrica es un concepto central y prioritario en la gestión moderna del agua. Esta seguridad implica garantizar el acceso suficiente, asequible y seguro del recurso hídrico para satisfacer las necesidades socioeconómicas y ambientales, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas (UN-Water,2022) Sin embargo, la seguridad hídrica es un reto cada vez más complejo y perentorio debido al crecimiento poblacional, el desarrollo de las ciudades, la degradación de la calidad del agua y el impacto de los efectos hidrológicos que deriva en las sequías e inundaciones (UNESCO, 2020).

Agua limpia, saneamiento y Objetivos de Desarrollo Sostenible

Debido a las diferentes problemáticas sociales, ambientales y económicas que surgieron a partir del cambio climático. En el 2015, las Naciones Unidas adoptó 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como un llamado universal para desarrollar estrategias que mitiguen y contribuyan a poner fin a la pobreza, proteger los ecosistemas, la biodiversidad, garantizar un acceso seguro de agua entre otros. Estos objetivos se conocen también como la agenda 2030, los firmaron 193 países miembros de la ONU y están encaminados a dar respuesta a los grandes desafíos mundiales. (PNUD, s.f.)

Teniendo en cuenta lo anterior, uno de los principales retos a nivel mundial es la crisis hídrica, esta problemática cuenta con un ODS específico que, dentro de la lista de los 17 objetivos es el ODS 6: Agua limpia y saneamiento. De acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación (s.f.) este ODS tiene como meta garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para toda la sociedad. Teniendo en cuenta que, el acceso a agua potable y el saneamiento es un derecho humano y representan una necesidad humana básica e importante para el cuidado de la salud de los seres humanos (Moran, 2024) Sin embargo, en diferentes partes del mundo, la disponibilidad de este recurso hídrico es cada vez más escaso. En algunos lugares, las sequías agravan la disponibilidad de agua, lo que

repercute negativamente en la productividad y bienestar de las personas, amenazando así el desarrollo sostenible y la biodiversidad en todo el mundo (Naciones Unidas Colombia, s. f.)

Por lo tanto, es fundamental implementar estrategias que garanticen el acceso al agua potable y saneamiento, mejoren la calidad del agua, incrementen su eficiencia en el uso y protejan los ecosistemas que producen y almacenan este recurso para contribuir al cumplimiento del ODS 6. Este cumplimiento requiere la adopción de soluciones innovadoras que diversifiquen las fuentes de abastecimiento y optimicen el consumo. En este caso, La captación y el tratamiento de aguas lluvias resulta como una estrategia complementaria que contribuye a la reducción de la presión sobre los sistemas de acueducto y la protección y el desarrollo ambiental. Además, fortalece la resiliencia urbana ante eventos extremos y promueve una cultura de uso eficiente del recurso hídrico (UN-Habitat, 2024)

Resiliencia Hídrica, Sistemas de Captación y Tratamiento de Aguas Lluvias.

La resiliencia hídrica se puede definir como la capacidad de una ciudad o comunidad para anticipar, resistir, adaptarse y recuperarse ante las adversidades relacionadas con el agua de manera eficiente y oportuna. Esta capacidad ha cobrado una especial importancia en el contexto urbano y rural actual, donde la diversidad en las fuentes de abastecimiento y la incorporación de tecnologías innovadoras son esenciales para fortalecer la gestión del agua (UN-Habitat, 2020). En este sentido, la participación de la comunidad se vuelve un factor clave para fomentar una cultura de sostenibilidad hídrica.

Bajo esta premisa, los sistemas de captación y tratamiento de aguas lluvias (SCALL), particularmente aquellos que recolectan agua desde cubiertas o techos, surgen como una alternativa sostenible, rentable y eficiente. Estos sistemas están compuestos principalmente por canaletas, bajantes, dispositivos de pretratamiento (filtros), tanques de almacenamiento y, en algunos casos, equipos de tratamiento complementario (desinfección). El agua sometida a

este tratamiento puede destinarse a usos domésticos no potables, como el riego de zonas verdes, la limpieza de exteriores o zonas comunes, la descarga de inodoros y el lavado de ropa (Campisano et al., 2017; Villarreal & Dixon, 2005). Una ventaja significativa de estos sistemas es su adaptabilidad, que permite implementarlos a diversos tipos de viviendas, escalándolos según las necesidades específicas y los recursos disponibles.

Factores y desafíos que Influyen en la viabilidad de la Captación y Tratamiento de Aguas Lluvias

Para la construcción de los sistemas de captación y tratamiento de agua lluvia (SCALL) se requiere tener en cuenta una serie de factores técnicos, ambientales y sociales que deben ser considerados para garantizar su eficiencia y sostenibilidad (Campisano et al., 2017; Mehrabadi et al., 2013).

Factores Determinantes:

- **Material y diseño de la superficie de captación:** La elección del material del techo (teja metálica, concreto, fibrocemento) y su pendiente influyen directamente en la eficiencia de la recolección y en la calidad inicial del agua, afectando variables como la turbiedad y la presencia de sólidos suspendidos.
- **Calidad ambiental:** En entornos urbanos como Bogotá, la contaminación atmosférica (material particulado, hollín, metales pesados) se deposita en las superficies de captación, especialmente después de períodos secos, lo que puede degradar la calidad del agua.
- **Patrones de precipitación:** La cantidad, intensidad y distribución temporal de las lluvias en la Sabana de Bogotá determinan el potencial de cosecha, la confiabilidad del suministro y dimensionan los requisitos de almacenamiento para superar períodos

de sequía, como en tiempos de fenómeno del niño, donde Bogotá sufre un desabastecimiento del recurso hídrico que pone en alerta la confiabilidad del sistema.

- **Mantenimiento del sistema:** La limpieza rutinaria de canaletas, la sustitución de filtros y la limpieza de tanques son críticas para garantizar la calidad del agua a lo largo del tiempo y prevenir riesgos sanitarios por la proliferación de patógenos o la obstrucción del sistema.

Desafíos para la Implementación:

A pesar de sus ventajas, la adopción masiva de estos sistemas enfrenta barreras significativas:

Potencial y Oportunidades:

Superar estos desafíos permite materializar beneficios transformadores, demostrados en experiencias internacionales en ciudades como Sídney, Berlín o São Paulo (Campisano et al., 2017; ONU-Hábitat, 2020):

- **Reducción de la Demanda:** Una disminución sustancial (entre 30% y 50%) en la extracción de agua potable de la red municipal para usos donde no se requiere, aliviando la presión sobre las fuentes hídricas y la infraestructura de acueducto.
- **Construcción de Resiliencia:** Mayor autonomía hídrica y capacidad de adaptación de los hogares ante sequías, restricciones o cortes en el suministro convencional de agua.
- **Sostenibilidad Económica y Ambiental:** Ahorros económicos progresivos en la factura de agua y una reducción en la generación de aguas residuales, contribuyendo a la descarga de los alcantarillados.

- **Réplica y Escalabilidad:** El diseño de los SCALL los convierte en una solución viable, flexible y replicable que puede ser adaptada a las condiciones específicas y recursos de cada hogar en barrios como El Ruby, facilitando su adopción gradual.

Consideraciones Técnicas, Normativas y Futuro de la Captación de Aguas Lluvias en Bogotá.

La captación y potabilización descentralizada de agua lluvia en áreas rurales dispersas de Colombia se consolida como estrategia de respuesta frente a la intermitencia o ausencia de acueductos formales, la vulnerabilidad de fuentes tradicionales ante estiajes y la persistencia de riesgos sanitarios por consumo de agua sin desinfección adecuada (IDEAM, 2022; MVCT, 2023; ESPB, 2023). En veredas andinas con régimen bimodal de lluvias, la precipitación disponible permite cubrir la fracción estrictamente potable de la demanda (aprox. 5–7 L/persona/día) si se aplican criterios rigurosos de dimensionamiento y operación (MVCT, 2021; IDEAM, 2022). A diferencia del enfoque urbano orientado a usos no potables, el contexto rural prioriza garantizar agua para ingestión, lo que demanda un tren multibarrera sencillo y sostenible que asegure reducción microbiológica y control de turbidez antes de la desinfección (MVCT, 2023; CAR, 2023).

Desde la perspectiva técnica, los principales factores de deterioro de la calidad del agua lluvia en zonas rurales incluyen: deposición de polvo mineral y material fino luego de periodos secos que elevan turbidez inicial (IDEAM, 2022); contaminación fecal intermitente por excretas de aves domésticas y silvestres como fuente primaria de *E. coli* (MVCT, 2023); lixiviación puntual de zinc u otros compuestos desde cubiertas metálicas envejecidas o tejas deterioradas (ESPB, 2023); y picos de color y sólidos en la primera fracción de esorrentía después de acumulaciones secas (IDEAM, 2022; MVCT, 2023). En territorios con actividad

agrícola, puede existir exposición potencial a trazas de agroquímicos transportados atmosféricamente, lo que refuerza la necesidad de prevención en origen y barreras físicas robustas (MVCT, 2021). Estos riesgos justifican la implementación de un tren de tratamiento que priorice la remoción de materia particulada y la desinfección eficaz (MVCT, 2023).

El enfoque multibarrera recomendado integra etapas secuenciales de prevención y tratamiento: (1) manejo preventivo de la superficie de captación mediante limpieza programada y control de acceso de animales (CAR, 2023; ESPB, 2023); (2) derivación de la primera descarga, con un volumen inicial de referencia de 0,8–1,2 L/m² ajustado tras monitoreo de turbidez y microbiología (ESPB, 2023; MVCT, 2023); (3) cribado y sedimentación para retener material grueso y reducir la carga a filtración (MVCT, 2023); (4) filtración de afinamiento mediante filtros de arena lenta o combinaciones grava + arena para estabilizar variaciones de turbidez (CAR, 2023; ESPB, 2023); (5) desinfección con hipoclorito garantizando residual libre dentro de los rangos normativos (Resolución 2115 de 2007; MVCT, 2023); y (6) almacenamiento sanitario en tanque opaco con tapa hermética, ventilación protegida y toma flotante para minimizar resuspensión (ESPB, 2023; MVCT, 2023). La priorización de la fracción potable (ingestión y preparación de alimentos) permite mantener continuidad sanitaria incluso cuando la disponibilidad total desciende en estiaje (MVCT, 2021; IDEAM, 2022). El dimensionamiento óptimo del tanque se fundamenta en series recientes de precipitación y en análisis de confiabilidad que evitan sobrecapacidad y tiempos de retención prolongados que degraden el residual de cloro (IDEAM, 2022; MVCT, 2023).

El esquema de monitoreo operativo mínimo comprende: medición diaria o interdiaria de cloro residual, seguimiento semanal de turbidez, inspecciones visuales de integridad y limpieza de canaletas, purga frecuente de la primera descarga y verificación microbiológica

puntual (*E. coli*) en la fase de validación y tras modificaciones estructurales (MVCT, 2023; CAR, 2023; ESPB, 2023). Las bitácoras comunitarias han demostrado utilidad para consolidar datos y activar acciones correctivas (CAR, 2023; ESPB, 2023). Las prácticas de mantenimiento (limpieza de cubierta antes de la temporada lluviosa, purga de sedimentos, raspado superficial de filtros lentos) reducen la variabilidad de turbidez y mejoran la consistencia del proceso de desinfección (MVCT, 2023; ESPB, 2023).

Desde el marco normativo, la Resolución 2115 de 2007 establece los criterios de calidad exigibles al agua para consumo humano, incluyendo ausencia de *E. coli* por 100 mL, control de turbidez (operativamente ≤ 5 NTU para asegurar eficiencia de desinfección), pH dentro del intervalo permitido y presencia de desinfectante residual libre (Resolución 2115 de 2007). Aunque la norma no fue diseñada específicamente para agua lluvia, su cumplimiento es obligatorio para cualquier fuente destinada a ingestión (Resolución 2115 de 2007).

Documentos recientes sobre calidad y abastecimiento resaltan brechas persistentes en la continuidad y seguridad del agua rural y respaldan la adopción de soluciones descentralizadas con soporte comunitario y acompañamiento técnico focalizado (MVCT, 2021; IDEAM, 2022; MVCT, 2023; CAR, 2023; ESPB, 2023).

Las perspectivas futuras apuntan a la consolidación de: (a) módulos estándar multibarrera de bajo costo con manuales operativos adaptados a capacidades locales (CAR, 2023; ESPB, 2023); (b) integración de registros digitales ligeros para trazabilidad de cloro residual y eventos de mantenimiento (ESPB, 2023); (c) esquemas de financiamiento comunitario para reposición de insumos y renovación de componentes (MVCT, 2021; CAR, 2023); (d) ampliación hacia sistemas colectivos (micro-infraestructura compartida) donde la densidad veredal permita economías de escala (MVCT, 2021; IDEAM, 2022); y (e) medición sistemática de impacto sanitario y de resiliencia frente a variabilidad climática (IDEAM,

2022; MVCT, 2023). La articulación entre gestión comunitaria y soporte institucional se proyecta como eje para reducir brechas de acceso a agua segura (MVCT, 2023; ESPB, 2023).

En síntesis, la transición desde modelos urbanos de aprovechamiento no potable hacia esquemas rurales de potabilización de agua lluvia exige disciplina en la aplicación de barreras, dimensionamiento basado en confiabilidad hídrica, cumplimiento estricto del marco sanitario y fortalecimiento organizativo local (Resolución 2115 de 2007; MVCT, 2023; CAR, 2023). La evidencia institucional reciente confirma que, con monitoreo básico y mantenimiento sistemático, la potabilización descentralizada de agua lluvia puede convertirse en un pilar de la seguridad hídrica y sanitaria rural en Colombia (IDEAM, 2022; MVCT, 2023; ESPB, 2023).

Metodología

Enfoque del Proyecto

El estudio tiene como objetivo diseñar un sistema de captación y tratamiento de aguas lluvias de bajo costo y fácilmente replicable en viviendas en la vereda Garibay del municipio de Togüí (Boyacá, Colombia). Por lo que esta investigación adopta un enfoque mixto, es decir, se necesita información tanto cuantitativa como cualitativa para realizar el diseño y plantear el tratamiento de potabilización de agua lluvia en la vereda Garibay del municipio de Togüí. En este caso, la investigación cualitativa se va a realizar por medio de entrevistas a los habitantes de la vereda con el objetivo de recolectar información y recopilar datos sobre las experiencias, opiniones y percepciones de los diferentes actores involucrados, comprendiendo los factores que influyen en la carencia de un sistema de tratamiento de agua

potable eficiente en Togüi. Por medio de esta entrevista, se busca conocer de una forma más real y cercana las historias de vida de los habitantes frente a la inseguridad hídrica que actualmente existe en la vereda. Del mismo modo, se va a llevar a cabo una revisión de la literatura académica, documentos y políticas de las diferentes entidades gubernamentales que permitan sustentar, analizar y comparar la información obtenida con la información históricamente registrada para realizar una trazabilidad entre el sistema de tratamiento propuesto y los lineamientos ambientales establecidos.

Por otra parte, la investigación cuantitativa se realiza por medio de diferentes laboratorios prácticos que permiten medir la eficiencia y el rendimiento del sistema de tratamiento de agua lluvia por medio del análisis de los datos obtenidos, lo cuales son indispensables para comparar, analizar y evaluar la viabilidad del tratamiento de una forma numérica y real. Asegurando que se cumplan todos los lineamientos ambientales y la normativa colombiana de agua potable establecida en la resolución 2115 del 2007, la cual menciona las características e instrumentos básicos de la calidad del agua para el consumo humano con el objetivo de cumplir los valores máximos permisibles de las características físicas y químicas del agua (MinVivienda, 2010)

Alcance del Proyecto

Este sistema se va a llevar a cabo mediante un estudio descriptivo, el cual se divide en diferentes etapas. En primera instancia es importante conocer las condiciones geográficas y climáticas de la vereda Garibay Togüí con el objetivo de caracterizar a profundidad los patrones climáticos de la zona, las actividades económicas y sociales del lugar y todo su contexto histórico en términos de seguridad hídrica. En segundo lugar, es fundamental plantear un diseño de tratamiento de agua lluvia para agua potable de acuerdo con los hallazgos obtenidos de la zona. Por último, se llevará a cabo un análisis de los resultados

suministrados por las pruebas de laboratorio en las que se evalúan parámetros químicos y físicos del agua para corroborar la viabilidad del tratamiento. Este enfoque no solo busca proporcionar información base e histórica de la vereda Garibay, sino también explorar y analizar los aspectos ambientales, económicos y sociales derivados por la falta de acceso a agua potable y saneamiento en esta comunidad.

Diseño del Proyecto

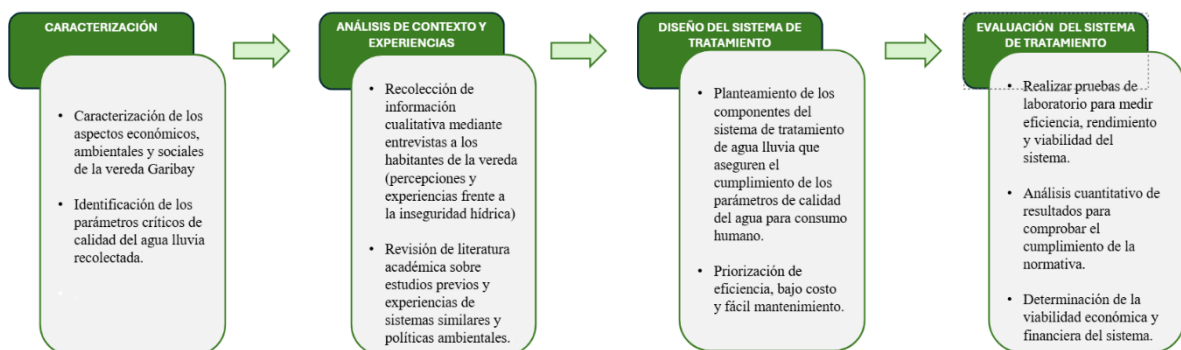
Esta investigación se desarrolla mediante un diseño no experimental, teniendo en cuenta que, busca caracterizar fenómenos sin manipular variables. En este caso, no se pueden alterar variables como las condiciones climáticas de la zona, la historia del municipio ni la percepción de los habitantes, por lo que es un estudio que se enfoca en observar y registrar la información base para plantear una posible solución de acuerdo con la problemática identificada, en este caso, el acceso limitado a agua potable para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes de la vereda Garibay

En la tabla 1 se describen los instrumentos empleados en las diferentes etapas de desarrollo del proyecto

Tabla 1.

Instrumentos por etapas de desarrollo del proyecto

Etapas de la metodología.



Herramientas y técnicas de recolección de información agroclimática

El estudio se desarrolla a través de diferentes herramientas y métodos de recolección de información. En primer lugar, es fundamental realizar una revisión exhaustiva de la literatura académica, documentos gubernamentales y la normativa colombiana, la cual, permite determinar una línea base sobre las condiciones y los parámetros con los que debe contar el sistema de tratamiento. Asimismo, para recolectar la información base como las características climáticas y el contexto de la Vereda en términos de seguridad hídrica se llevará a cabo por medio de entrevistas con el fin de obtener información de fuentes directas con los habitantes de Garibay y conocer su percepción y opinión sobre la problemática de acceso a agua potable que actualmente vive la vereda. En segundo lugar, se emplearán plataformas digitales como Strata para analizar el histórico acumulado de las condiciones climáticas del lugar y, asimismo, realizar un seguimiento continuo de las condiciones climáticas de la vereda, haciendo especial énfasis en las precipitaciones de la zona. Por último, se llevarán a cabo una serie de laboratorios prácticos en los que se van a medir y caracterizar los sólidos disueltos totales, turbiedad, pH y concentración de cloro residual para evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento mediante un análisis cuantitativo sobre las características físicas y químicas que se obtendrán del tratamiento de agua lluvia, lo cual permite comparar estos datos con los niveles máximos permisibles para agua potable según la resolución 2115 del 2007 para analizar la viabilidad, replicabilidad y escalabilidad del sistema de tratamiento en otras casas ubicadas en la vereda.

La tabla 2 presenta el plan metodológico por etapas para diseñar, evaluar e implementar un sistema de captación y tratamiento de agua lluvia en la vereda Garibay. Cada fila articula el instrumento/etapa, la metodología a emplear y el resultado esperado

Tabla 2.

Metodología para diseñar, evaluar e implementar el sistema de captación y tratamiento de agua lluvia.

Instrumento/Etapa	Metodología	Resultado esperado
Etapa 1: Revisión documental y normativa	Revisión exhaustiva de la literatura académica, documentos gubernamentales y normativa colombiana (Resolución 2115 de 2007) para establecer la línea base de a calidad del agua y lineamientos ambientales.	Línea base de parámetros de calidad de agua potable en Colombia y referentes normativos para diseñar el sistema de captación y tratamiento de agua lluvia.
Etapa 2: Análisis climático de la zona	Uso de plataformas digitales (ej. Strata) para analizar datos históricos de precipitación y realizar seguimiento de las condiciones climáticas locales.	Identificación de la viabilidad del sistema en el contexto climático de la vereda Garibay
Etapa 3: Entrevistas y diagnóstico comunitario	Entrevistas semiestructuradas a habitantes de la vereda Garibay para conocer experiencias, percepciones y opiniones frente al acceso al agua potable. Levantamiento de información sobre características climáticas, sociales y de seguridad hídrica.	Diagnóstico social y ambiental de la problemática de acceso a agua potable en la vereda Garibay. Identificación de factores que influyen en la inseguridad hídrica.
Etapa 4: Laboratorio prácticos de análisis del agua	Pruebas de laboratorio para medir parámetros físicos y químicos del agua lluvia recolectada y tratada. Comparación con valores máximos permisibles establecidos en la resolución 2115 de 2007	Evaluación cuantitativa de la eficiencia y rendimiento del sistema de tratamiento de agua lluvia en condiciones reales y su potencial de implementación y replicabilidad en más viviendas de la vereda

Herramientas y técnicas de diseño

1. Herramientas:

1.1 Normativa y lineamientos oficiales.

- RAS – Resolución 0330 de 2017 (criterios de filtración rápida, espesores, líneas generales de tratamiento).
- Resolución 2115 de 2007 (parámetros de calidad para consumo humano, referencia de riesgo microbiológico y físico-químico).
- WHO Guidelines for Drinking-water Quality, actualización 2022 (criterios de turbidez, desinfección y enfoque de múltiples barreras).

1.2 Documentos técnicos y guías

- ECB 2023-12 (Engineering and Construction Bulletin, 2023): resume el uso del algoritmo Sequent Peak para dimensionamiento de almacenamiento (adaptable a captación de lluvia).
- Actualizaciones WHO 2022: refuerzo de turbidez <5 NTU para desinfección efectiva.

1.3 Investigaciones (calidad de lluvia, first flush, dimensionamiento, filtración lenta)

- Effective first flush volumes in experimental household-scale rainwater catchment systems (AQUA, 2023).
- Characterisation of First Flush for Rainwater Harvesting (Water, 2025).
- Optimising rainwater harvesting systems under uncertainty (2025) – optimización y confiabilidad de almacenamiento.
- Estudios recientes de filtración lenta y biofiltración:
 - a) Enhancing slow sand filtration for safe drinking water (Water Research, 2024).
 - b) Sustainable Application of Slow Sand Filters (Sustainability, 2024).
 - c) Exploring carbon dynamics in a slow sand filter (Water Research,

2025).

d) Combined Sedimentation and Biofilm-based Slow Sand Filtration
(Applied Sciences, 2024).

1.4 Herramientas analíticas

- Hojas de cálculo para balance hídrico mensual.
- Kits portátiles (pH, cloro).
- Muestreo de eventos de lluvia estratificados (inicio vs estabilización).

1.5 Criterios de selección y matrices

Basados en: WHO 2022 (riesgo microbiológico y turbidez), RAS 2017 (tasas), y evidencia experimental 2023–2025 sobre first flush y desempeño de filtros lentos.

Análisis de restricciones

1. Restricciones Legales y Normativas

En Colombia, la Ley 2115 de 2007 regula la gestión del agua y establece los requisitos para la calidad del agua potable. Esta ley es clave para el diseño de cualquier sistema de potabilización, ya que define las normas sobre los métodos de tratamiento y los parámetros de calidad que deben cumplirse para garantizar que el agua sea segura para el consumo humano.

Restricción:

- El cumplimiento con los estándares de calidad establecidos por la Ley 2115 de 2007, que exige que el sistema de potabilización cumpla con ciertos parámetros sanitarios y de seguridad, lo cual podría complicar la implementación de un sistema de bajo costo.

Estrategias:

- Se debe diseñar el sistema de manera que se sigan las pautas de la ley, utilizando tecnologías que permitan cumplir con los requisitos de calidad, como la filtración adecuada y la cloración. Además, es fundamental obtener los permisos necesarios de las autoridades locales para asegurar que el proyecto sea legalmente viable.

2. Restricciones Técnicas

Las dificultades logísticas y técnicas son una consideración importante, sobre todo en zonas rurales. En la vereda Garibay, el transporte de materiales y la logística pueden ser factores limitantes, dado que la comunidad puede estar alejada de los principales centros de distribución de materiales, como Homecenter o ferreterías locales.

Restricción:

- La dificultad de acceder a materiales de calidad debido a la ubicación remota y la infraestructura limitada podría aumentar los costos de construcción y prolongar los tiempos de implementación.

Estrategias:

- Es crucial planificar con anticipación la adquisición de materiales, buscando proveedores cercanos para reducir los costos de transporte. Además, se pueden utilizar materiales locales, fáciles de transportar y económicos, lo que contribuiría a mantener el costo general bajo control. La colaboración con empresas locales también podría facilitar la logística.

3. Restricciones Económicas y Financieras

Una mirada más detallada muestra varios desafíos que deben ser considerados para asegurar la viabilidad del proyecto a largo plazo.

Restricción:

- Aunque el costo inicial puede ser manejable mediante el uso de tecnologías de bajo costo, los costos operativos y de mantenimiento a largo plazo son una preocupación constante. Además, el acceso limitado a financiamiento externo en áreas rurales puede dificultar la obtención de recursos adicionales para la implementación del proyecto.

Estrategias:

1. Optimización de los costos de construcción y operación: Es fundamental usar materiales locales de bajo costo para reducir la inversión inicial. Además, se debe elegir una tecnología de tratamiento sencilla y accesible, como filtros de arena o sistemas de cloración, que no impliquen altos costos operativos.
2. Desarrollo de un modelo de financiamiento participativo: En lugar de depender completamente de ayudas externas, se podría implementar un modelo en el que las familias contribuyan parcialmente al costo de implementación. Esto permitiría repartir la carga económica y promover el sentido de responsabilidad y sostenibilidad dentro de la comunidad.
3. Entrenamiento para mantenimiento local: Capacitar a los miembros de la comunidad para que sean responsables del mantenimiento y reparación del sistema, reduciendo así los costos recurrentes de contratación de personal externo.

4. Exploración de fuentes de financiamiento externo: Buscar apoyos de ONGs, organizaciones internacionales y programas gubernamentales como el Plan Nacional de Agua y Saneamiento para financiar la instalación inicial. Este tipo de financiación es común para proyectos de infraestructura básica en zonas rurales.

4. Restricciones Ambientales

Una de las principales restricciones en zonas rurales como la vereda Garibay es la variabilidad climática, que puede afectar la cantidad y distribución de las precipitaciones. En muchos casos, la captación de agua lluvia depende en gran medida de las lluvias regulares, y cualquier cambio en los patrones climáticos puede reducir la cantidad de agua disponible para consumo.

Restricción:

- Las variaciones en el clima, especialmente la sequía o las lluvias irregulares, podrían hacer que el sistema de captación no sea suficiente en algunos periodos del año.

Estrategias:

- **Diseño flexible del sistema:** Es importante dimensionar adecuadamente el sistema de almacenamiento, de modo que pueda retener suficiente agua durante los períodos de lluvia para abastecer a la comunidad en épocas secas. Además, se podría considerar la inclusión de un sistema de gestión que permita complementar el suministro de agua cuando la captación no sea suficiente.

- Análisis de datos climáticos locales: Utilizar información meteorológica histórica para dimensionar el sistema de acuerdo con la disponibilidad promedio de agua en la región.

5. Restricciones de Salud y Seguridad

El tratamiento adecuado del agua es crucial para garantizar la salud pública. En este caso, la Norma 2115 de 2007 también establece las pautas para la potabilización del agua, lo que implica que el sistema debe cumplir con los estándares sanitarios para prevenir enfermedades transmitidas por el agua.

Restricción:

- Un diseño inadecuado del sistema o la falta de un mantenimiento adecuado podría comprometer la calidad del agua y generar riesgos de salud para la comunidad.

Estrategias:

- Capacitación en salud y seguridad: Es esencial que la comunidad reciba capacitación sobre cómo utilizar y mantener el sistema de captación de agua correctamente, así como sobre los procesos de tratamiento para asegurar la calidad del agua.
- Monitoreo constante de la calidad del agua: Implementar un sistema de monitoreo simple y asequible para garantizar que el agua cumpla con los parámetros establecidos para consumo humano.

6. Restricciones Sociales y Culturales

En comunidades rurales, las costumbres y creencias locales pueden influir significativamente en la aceptación de nuevas tecnologías. En este caso, la comunidad podría tener dudas sobre la efectividad o seguridad del sistema de potabilización de agua, especialmente si no están familiarizados con las tecnologías propuestas.

Restricción:

- La resistencia cultural o la falta de familiaridad con las tecnologías de captación y tratamiento de aguas lluvia podría obstaculizar la aceptación del sistema.

Estrategias:

- Participación de la comunidad: Involucrar a los miembros de la comunidad desde el principio, dándoles la oportunidad de influir en el diseño del sistema. Organizar talleres y charlas de sensibilización para explicar los beneficios de la captación y potabilización del agua.
- Adaptación a las costumbres locales: Asegurarse de que el sistema sea fácil de usar y compatible con las prácticas locales, para que sea bien recibido por los habitantes.

7. Restricciones Políticas y Gubernamentales

La burocracia y la falta de apoyo gubernamental pueden ser obstáculos significativos en proyectos de infraestructura en zonas rurales. Los procedimientos largos y complicados para obtener permisos y financiación pueden retrasar la implementación del proyecto.

Restricción:

- La falta de apoyo político o la lentitud en los procesos administrativos pueden afectar los plazos y la viabilidad del proyecto.

Estrategias:

- Búsqueda de alianzas políticas: Establecer relaciones con autoridades locales y regionales que puedan facilitar los permisos y obtener apoyo para el proyecto. Además, se pueden explorar alianzas con ONGs y organismos internacionales que ofrezcan apoyo en proyectos de infraestructura rural.

Resultados**Sistema de tratamiento**

El sistema de tratamiento que convierte el agua lluvia en agua potable cuenta con tres etapas fundamentales como se puede evidenciar en la **Figura 1**. A grandes rasgos, el sistema consta de tres tanques grandes, el primero, de derecha a izquierda, almacena el agua lluvia, la cual es captada por medio de una tubería que está junto a la teja de la finca donde se implementó el piloto. Este contenedor se conecta con el otro por medio de tubos con válvulas, lo que permite el flujo del agua de un tanque a otro. El segundo tanque cuenta con capas de gravilla y arena que permiten retener sólidos e impurezas del agua lluvia captada. Por último, el tercer tanque recibe y almacena el agua tratada.

Figura 1. Sistema de tratamiento de agua lluvia



A continuación, se explica de una forma más detallada cada etapa del sistema de tratamiento, iniciando con la **Figura 2**. La imagen muestra el tanque de almacenamiento del agua lluvia, el cual se llenó, después de una noche con altas precipitaciones. Este tanque se caracteriza por estar conectado con la teja donde se capta el agua. En el tubo de recolección, se puso un primer filtro como lo muestra la **Figura 3** que atrapa los sólidos más grandes que pueda tener el agua, como hojas, insectos, ramas entre otros. Sin embargo, no todos los sólidos y las impurezas del agua lluvia quedan estancados en el primer filtro, por lo que varios de estos sólidos se sedimentan en el fondo del tanque como lo muestra la **Figura 4**.

Figura 2. Tanque de almacenamiento **Figura 3.** Filtro de sólidos grandes



Figura 4. Solidos sedimentados en el fondo del tanque de almacenamiento



El tanque de almacenamiento se conecta con el tanque que contiene el medio filtrante, por medio de tubos los cuales cuentan con válvulas que controlan el flujo del agua. En este

caso, la **Figura 5** muestra el tanque filtrante por fuera y la **Figura 6** muestra el sistema de filtración que contiene el tanque. En este caso, los medios filtrantes utilizados fueron gravilla y arena, se emplearon siete partes de arena por cada parte de gravilla. En esta etapa, se retienen todas las impurezas y el agua se va tratando como se muestra en la **Figura 7**, mientras el flujo pasa por la última válvula que se conecta con el tanque de almacenamiento de agua previamente tratada.

Figura 5. Tanque filtrante

Figura 6. Medio filtrante empleado (Arena)



Figura 7. Proceso de filtración



Para terminar, el agua tratada se almacena en el último tanque como lo muestra la **Figura 8**. Evidenciando cambios notorios desde las características organolépticas como el color, un indicador visual en el que se puede observar que el agua del acueducto de la **Figura 9**, presenta un color amarillo, la coloración puede deberse a materia orgánica u otras sustancias disueltas en el agua, mientras que el agua tratada tiene un color transparente, lo que refleja un agua pura.

Figura 8. Tanque de almacenamiento con agua tratada



Figura 9. Comparación visual entre el agua acueducto y agua tratada



Para sustentar el sistema de tratamiento de agua y corroborar la información organoléptica obtenida, se llevó a cabo un laboratorio mediante el cual, se analizó a fondo la turbiedad, el pH, la conductividad, el color aparente, la dureza, la demanda química de oxígeno y el cloro residual de la muestra del agua del acueducto y el agua tratada, permitiendo comparar los valores y resultados obtenidos con la normativa colombiana. Por esta razón, en el siguiente apartado se exponen los resultados y su respectivo análisis con los límites máximos permisibles para cada parámetro.

Análisis de resultados

Tabla 1

Comparación de parámetros de calidad del agua entre el agua tratada del proyecto, el agua del acueducto y la normativa colombiana

Parámetro	Unidad	Agua del acueducto	Agua tratada (proyecto)	Norma colombiana (Res. 2115 de 2007)
Turbidez	UNT	7,1	0,50	≤ 2 UNT
Cloro residual	mg/L	0,10	0,42	0,3 – 2,0 mg/L
pH	—	6,3	6,9	6,5 – 9,0

Parámetro	Unidad	Agua del acueducto	Agua tratada (proyecto)	Norma colombiana (Res. 2115 de 2007)
Conductividad	μS/cm	19	200	≤ 1000 μS/cm
Color aparente	Unidades Pt-Co	144	12	≤ 15 unidades
Dureza total (como CaCO ₃)	mg/L	15	62	≤ 300 mg/L

Nota. Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos permiten evidenciar mejoras significativas en la calidad del agua tratada mediante el sistema implementado en el proyecto, en comparación con el agua suministrada por el acueducto local. En primer lugar, la turbidez disminuyó de **7,1 UNT a 0,50 UNT**, alcanzando un valor inferior al límite máximo de 2 UNT establecido por la *Resolución 2115 de 2007*, lo cual refleja una mayor eficiencia en la remoción de partículas suspendidas.

En cuanto al cloro libre residual, el agua tratada está dentro del rango permitido (0,3 – 2,0 mg/L), garantizando la desinfección adecuada sin riesgo de sobredosificación. El pH del agua tratada (**6,9**) se mantiene dentro del intervalo recomendado (6,5 – 9,0), lo cual favorece la estabilidad química del agua y la efectividad del cloro como desinfectante.

La conductividad presentó un incremento de **19 a 200 μS/cm**, permaneciendo muy por debajo del límite de 1000 μS/cm, lo que indica una concentración aceptable de sales disueltas. De igual manera, el color aparente pasó de 144 a 12 unidades Pt-Co, evidenciando una mejora perceptible en la apariencia del agua. Finalmente, la dureza total se incrementó de **15 a 62 mg/L** como CaCO₃, valor que sigue cumpliendo holgadamente con el límite de 300 mg/L establecido por la norma.

En conjunto, los resultados confirman que el tratamiento propuesto logra optimizar la calidad del agua para consumo humano, cumpliendo con los parámetros exigidos por la legislación

colombiana vigente y mejorando los indicadores físico-químicos respecto al agua del acueducto de la zona de estudio en Boyacá

Análisis de costos

Tabla 2

Costos asociados a la compra de materiales e insumos para el desarrollo del proyecto

Tienda / Proveedor	Ítem	Costo unitario (COP)	Cantidad	Total (COP)
Homecenter	Arena sílice	\$22.900	1	\$22.900
	Gravilla	\$12.900	1	\$12.900
La Sabana	Flanche PVC 2"	\$20.000	1	\$20.000
	Adaptador hembra PVC presión 2"	\$5.568	1	\$5.568
	Codo PVC presión 2"	\$6.665	1	\$6.665
	Unión lisa PVC presión 3"	\$12.184	1	\$12.184
	O-ring 3"	\$5.462	1	\$5.462
	O-ring 2"	\$3.781	1	\$3.781
	Adaptador macho PF 1/2" ECO	\$1.680	2	\$3.360
	Registro PCP Rosca 1/2"	\$5.462	1	\$5.462

	Tee rápida acometida 16 mm ECO	\$3.361	1	\$3.361
	Adaptador macho PVC presión 1/2"	\$220	5	\$1.100
	Unión rosca PVC 1/2"	\$756	5	\$3.780
	Empaque 1" acople rápido	\$840	10	\$8.400
	Llave jardín blanca cobre 1/2"	\$3.361	1	\$3.361
	Empaque 3" acople rápido	\$1.260	2	\$2.520
Proveedor desconocido	Canecas de 8 galones nuevas	\$52.000	3	\$156.000
Ferretería local	Pegamento para PVC Pavco 118 mL	\$22.000	1	\$22.000
	Tubería calibre sanitario 2"	\$6.000	1	\$6.000
	Filtro de malla ancho 1/2 m	\$6.000	1	\$6.000
Mercado Libre	Kit Cloro Total	—	—	—
Total proyecto				\$310.804

Nota. Los valores en pesos colombianos (COP) corresponden a costos directos para la construcción del sistema de tratamiento de agua del proyecto (elaboración propia).

A partir del desglose de costos directos del proyecto de tratamiento de agua, se observa que:

- La mayor inversión se concentra en la adquisición de insumos físicos (arena sílice, gravilla, PVC, conexiones, canecas, sellos y accesorios), lo que indica que el proyecto es de bajo costo de infraestructura y de fácil implementación.
- El total del presupuesto es de \$310.804 COP, lo que sugiere que se trata de un sistema económicamente viable y accesible para comunidades rurales o proyectos piloto.
- El componente de compras se distribuye en varios proveedores (ferreterías, tiendas grandes y comercio electrónico), lo que indica que no es necesario un proveedor especializado para obtener los materiales.
- No se evidencian equipos de alta tecnología ni costos elevados en maquinaria, lo que confirma la naturaleza manual y de bajo mantenimiento del sistema de tratamiento.

En síntesis, el costo del proyecto demuestra que se puede implementar una solución de tratamiento de agua funcional y de bajo costo, accesible para comunidades con recursos limitados.

CONCLUSIONES

El proyecto demostró ser eficaz a los estándares de calidad evaluados, evidenciando que un sistema modular, de bajo costo y de fácil mantenimiento puede transformar el agua lluvia en un recurso mucho más seguro que el servicio que ofrece el acueducto veredal

actualmente para la comunidad de Togüí. Los resultados de laboratorio en turbidez, color, pH, cloro residual y otros indicadores fisico-químicos mostraron no solo el cumplimiento de la Resolución 2115 de 2007 en los parámetros trabajados, sino, una mejora tangible respecto a la fuente convencional, lo que confirma la solidez técnica de la alternativa propuesta y su pertinencia para contextos rurales andinos. Al integrar captación, filtración y desinfección en un esquema multibarrera sencillo, el sistema se posiciona como una herramienta concreta para reducir la exposición a contaminantes y avanzar hacia condiciones de mayor seguridad hídrica en la vereda Garibay.

Sin embargo, el hecho de que los resultados hayan sido favorables no exime la necesidad de una evaluación más amplia, crítica y prolongada en el tiempo para afirmar con plena certeza la potabilidad integral del agua producida. Aún se requiere profundizar en análisis microbiológicos sistemáticos, en la verificación de estabilidad de la calidad bajo diferentes eventos de lluvia y en el monitoreo de posibles variaciones asociadas a mantenimiento, operación y cambios estacionales. De igual forma, aunque los análisis y el conocimiento de la zona permiten descartar razonablemente la presencia significativa de sólidos disueltos nocivos, es recomendable consolidar campañas analíticas específicas que ratifiquen la ausencia de metales, compuestos azufrados y compuestos orgánicos volátiles, fortaleciendo así el nivel de confianza sanitaria del sistema. Esta ruta de validación continua no contradice los logros del proyecto; al contrario, los potencia, al convertir el prototipo en una base sólida sobre la cual construir protocolos de seguimiento y mejora.

En relación con la presencia de sustancias disueltas potencialmente peligrosas, el análisis del contexto local, de los materiales de construcción y de los usos circundantes del suelo indica que no existen fuentes constantes que justifiquen aportes relevantes de compuestos sulfurados o compuestos orgánicos volátiles disueltos, típicos de ciertas actividades industriales o de contaminación crónica. El origen pluvial del recurso, la ausencia

de descargas industriales cercanas y la utilización de materiales inertes y de uso común en sistemas de agua rural reducen de manera importante la probabilidad de este tipo de contaminantes. Aun así, la buena práctica de la ingeniería sanitaria demanda que esta hipótesis se consolide con mediciones periódicas y, eventualmente, con análisis puntuales de laboratorio especializados, de modo que la comunidad y las autoridades de salud pública cuenten con evidencia robusta que respalde la inocuidad del sistema a largo plazo. De este modo, se articula la innovación de bajo costo con una cultura de verificación científica y de mejora continua.

Más allá de los aspectos estrictamente técnicos, el sistema propuesto contribuye de manera directa al fortalecimiento de la soberanía hídrica de pequeñas comunidades rurales latinoamericanas, como Garibay, que históricamente han dependido de infraestructuras frágiles y de decisiones externas sobre su acceso al agua. La posibilidad de captar, tratar y gestionar localmente el agua lluvia otorga a las familias una mayor capacidad de decisión sobre su propio recurso, disminuye la dependencia de acueductos intermitentes y abre la puerta a modelos de gobernanza comunitaria del agua basados en la corresponsabilidad, el monitoreo participativo y el mantenimiento local. En este sentido, la experiencia desarrollada no es solo un ejercicio técnico, sino también un paso concreto hacia el empoderamiento de la comunidad, que puede pasar de ser usuaria pasiva de un servicio deficiente a convertirse en co-gestora de una solución hídrica adaptada a su realidad territorial, climática y socioeconómica.

Esta perspectiva de soberanía hídrica es especialmente relevante en el contexto latinoamericano, donde muchas veredas, caseríos y comunidades rurales comparten retos similares de variabilidad climática, precariedad institucional y limitaciones de inversión en infraestructura centralizada. Proyectos como el desarrollado en Garibay demuestran que es posible llevar soluciones reales en tiempo real: tecnologías sencillas, replicables y

financiables que respondan a las necesidades inmediatas sin esperar grandes obras que, con frecuencia, tardan años en materializarse o nunca llegan. La modularidad del sistema, su bajo costo de implementación y su capacidad de adaptarse a diferentes cubiertas, patrones de lluvia y tamaños de vivienda lo convierten en un modelo susceptible de ser multiplicado en otros territorios, aportando a una red de soluciones locales que, en conjunto, refuerzan la resiliencia hídrica regional.

Al mismo tiempo, el proyecto evidencia que la respuesta a la crisis hídrica rural no puede limitarse a una dimensión puramente técnica, sino que debe incluir componentes de educación, apropiación social del conocimiento y articulación con políticas públicas. La capacitación de los habitantes en operación, cloración, limpieza de filtros y lectura básica de parámetros sencillos como el cloro residual o el pH es indispensable para sostener en el tiempo los buenos resultados alcanzados en las pruebas iniciales. De igual manera, la documentación de la experiencia, la generación de protocolos de operación y la elaboración de guías ilustradas para la comunidad ayudan a que el sistema no dependa exclusivamente de uno o dos operadores, sino que se integre a la vida cotidiana de las familias y a los espacios organizativos de la vereda. Así, el sistema se convierte en un componente de una estrategia más amplia de seguridad y soberanía hídrica, antes que en un dispositivo aislado.

En síntesis, la investigación confirma que un sistema modular y de bajo costo para captación, almacenamiento y tratamiento de agua lluvia puede cumplir los estándares evaluados, mejorar la calidad del agua respecto a la fuente actual y ofrecer una alternativa viable, replicable y coherente con las condiciones rurales de Garibay. Al mismo tiempo, marca con claridad los pasos siguientes: profundizar el análisis para garantizar la ausencia de sólidos disueltos nocivos y contaminantes específicos, robustecer el monitoreo microbiológico y consolidar rutinas de control y mantenimiento comunitario. Con estas acciones, el prototipo podría evolucionar de solución piloto a referencia de política local y

regional, aportando a que más comunidades rurales latinoamericanas avancen hacia la soberanía hídrica, con soluciones que nacen de su propio territorio, responden a sus urgencias y se implementan con tiempos y recursos realistas.

Referencias

Alcaldía Municipal de Togüi. (2024). PLAN DE DESARROLLO – MUNICIPIO DE TOGÜÍ. <https://www.togui-boyaca.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-2024-2027>

Banco Interamericano de Desarrollo. (2023). *Agua y saneamiento para todos: Estrategias para enfrentar el déficit en las áreas rurales de América Latina y el Caribe*. <https://blogs.iadb.org/agua/es/agua-y-saneamiento-para-todos-estrategias-para-enfrentar-el-deficit-en-las-areas-rurales-de-america-latina-y-el-caribe/>

Congreso de Colombia. (1997). *Ley 373 de 1997. Por la cual se establece el régimen de protección y conservación del recurso hídrico y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 43.530, 18 de diciembre de 1997. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-373-1997.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (s. f.). *Agua limpia y saneamiento*. DNP. <https://ods.dnp.gov.co/es/objetivos/agua-limpia-y-saneamiento>

Despins, C., Farahbakhsh, K., & Leidl, C. (2009). Assessment of rainwater quality from roofs for potable and non-potable uses. *Building and Environment*, 44(4), 799–806. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.012>

FAO. (s. f.). *El Niño | FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <https://www.fao.org/el-nino/es>

Farreny, R., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2011). Cost-efficiency of rainwater harvesting strategies in dense Mediterranean neighbourhoods. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.01.008>

Fewtrell, L., & Kay, D. (2007). Microbial quality of rainwater supplies in developed countries. *Journal of Water and Health*, 5(2), 149–158. <https://doi.org/10.2166/wh.2006.055>

Greenpeace Colombia. (2024, 21 octubre). *Colombia megadiversa: ¿Qué es la biodiversidad y por qué es tan importante en Colombia? ¿Qué pasaría si no se protege?* - Greenpeace Colombia. https://www.greenpeace.org/colombia/blog/campanas/bosques/colombia-megadiversa-que-es-la-biodiversidad-y-por-que-es-tan-importante-en-colombia-que-pasaria-si-no-se-protege/?gad_source=1&gad_campaignid=22869876649&gbraid=0AAAAADNV0mX8mXKKelaHKzR5W-sK3kmKO&gclid=CjwKCAjwwNbEBhBpEiwAFYlTGCQwa4ZHEvzzolz5A3UUJCo51ek6Tpojgccc3evN2cWqho9iCZ5NOhoCeGsQAvD_BwE

Gobernación de Boyacá. (2013). Mapa de riesgo de la calidad del agua para consumo humano de la fuente abastecedora del casco urbano del municipio de Togüi - Boyacá. https://www.boyaca.gov.co/secretariasalud/wp-content/uploads/sites/67/2014/07/images_Documentos_Salud_Publica_Ano_2014_AGUA_CONSUMO_HUMANO_MAPA_RIESGO_MAPA-DE-RIESGO-DE-TOGUI.pdf

Gobernación de Boyacá. (2020). ANÁLISIS DE SITUACIÓN DE SALUD CON EL MODELO DE LOS DETERMINANTES SOCIALES DE SALUD, MUNICIPIO DE TOGÜÍ BOYACÁ. https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/asis2020/asis_togui_2020.pdf?utm_source=chatgpt.com

IDEAM. (2022). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Instituto Nacional de Salud [INS]. (2023). Lineamientos Nacionales de vigilancia en Salud pública. En Instituto Nacional de Salud.
<https://www.ins.gov.co/BibliotecaDigital/lineamientos-nacionales-2023.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2021). *Informe de calidad del agua en Colombia 2020*.
https://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/CPT/informe/Informe.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s. f.). *CONCEPTOS BÁSICOS DE CAMBIO CLIMÁTICO - IDEAM*. IDEAM.
<http://www.cambioclimatico.gov.co/otras-iniciativas>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). *El IDEAM presenta nuevas proyecciones climáticas para Colombia: Escenarios de cambio climático* [Artículo]. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/noticia/el-ideam-presenta-nuevas-proyecciones-climaticas-para-colombia-escenarios-de-cambio-climatico-al>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). Sitios turísticos.
<https://archivo.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

IDEAM. (2024). *Seguimiento al ciclo ENOS: El Niño – Oscilación del Sur (Boletín No. 187)*.
https://d41chssnpqne.cloudfront.net/user_upload_by_module/chat_bot/files/86324963/abbrmulX7Yz1BNYV.pdf?Expires=1759382853&Signature=Nc9O1VNRfCP3dyYDH~h9ma4zmdWq2LyxOtR9YHAFsHPCZXbUAR2mPKI-bxwZYwPopkxCg58S3kmumE2-Rzgl5OoKQs1a3U5r8Ea1PX8ZK~9f8pEesyk~oKY-iQuDxXHzy1bE0Ktd~wfpb6xYQcaqz8MfdwDWaxpeh80TJjRk-AoW4gSHwnPEZk53utu5clbOz3D5I0caYipOZZqdkuWF-Y1W0~YsOKsTTTd31shejT7LYsrVyz-j55x6YrWbPXpQlv3wt6GZklbe3rBoU~3MdWo4qDO-qxztSfJTMm5w-uGpPrITOGRHkT2ZElvSNN2SENSo2TgUPE405eLbCd~A_&Key-Pair-Id=K3USGZIKWMDCSX

IPCC. (2021). *Cambio climático*.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf

Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, L. H., Choe, J. S., & Yu, M. J. (2002). First flush analysis of urban storm runoff. *Science of the Total Environment*, 293(1–3), 163–175.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)01174-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01174-7)

Maykot, J. K., Martins Vaz, I. C., & Ghisi, E. (2025). *Characterisation of first flush for rainwater harvesting purposes in buildings*. *Water*, 17, 1772.
<https://doi.org/10.3390/w17121772>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico. Bogotá, Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Informe de Gestión Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Informe-de-Gestion-Minambiente-2021-VF-PUBLIC.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022, 18 enero). *¿Qué es el Cambio Climático?* -. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/que-es-el-cambio-climatico/>

Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. (2023, 22 marzo). *Colombia, riqueza hídrica del mundo*. <https://www.minambiente.gov.co/colombia-riqueza-hidrica-del-mundo/>

Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Decreto 1575 de 2007 (Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano). *Diario Oficial No. 46.183*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=30007>

Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución 2115 de 2007 (Por la cual se señalan las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano). *Diario Oficial No. 46.183*. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2007). *Resolución 2115 de 2007*. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2115%20-%202007.pdf>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2023). Informe de Gestión. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/20240131_informe-de-gestion-2023.pdf

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Decreto 1077 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio). *Diario Oficial No. 49.160*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>

MinVivienda. (2007). Resolución 2115 - 2007 | MinVivienda. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>

Min Vivienda. (2023). Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/informe-nacional-de-calidad-del-agua-para-consumo-humano-inca-2023.pdf>

Moran, M. (2024, 26 enero). *Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Naciones Unidas Colombia. (s. f.). *Sustainable Development Goal 6: Agua limpia y saneamiento* | *Las Naciones Unidas en Colombia*. Sustainable Development Goal 6: Agua Limpia y Saneamiento | las Naciones Unidas En Colombia. <https://colombia.un.org/es/sdgs/6>

Naciones Unidas. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://sdgs.un.org>

National Geographic. (2024). ¿Qué es el fenómeno de La Niña? *National Geographic*. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2024/04/que-es-el-fenomeno-de-la-nina>

Ortiz, R., Núñez, A., Cathala, C., Rios, A. R., Nalesso, M. (2021). *El agua en tiempos de sequía II: Lecciones de sequías alrededor del mundo* (Nota técnica No. IDB-TN-2246). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://www.iadb.org>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (s. f.). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

Prüss-Ustün, A., Wolf, J., Bartram, J., Clasen, T., Cumming, O., Freeman, M. C., Gordon, B., Hunter, P. R., Medlicott, K., & Johnston, R. (2019). *Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: An updated analysis with a focus on low- and middle-income countries*. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(5), 765-777. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.05.00>

Superservicios. (2023). Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/inca-calidad-agua-consumo-humano-2023.pdf>

Torrado, S., Torrado, S., & Torrado, S. (2025, 11 abril). Bogotá acaba con el racionamiento de agua un año después. *El País América Colombia*. <https://elpais.com/america-colombia/2025-04-11/bogota-acaba-con-el-rationamiento-de-agua-un-ano-despues.html>

UNDP. (s. f.). ¿Qué son los objetivos de desarrollo sostenible? <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

UNESCO. (2020). *El futuro del agua es la seguridad hídrica*. <https://www.unesco.org/es/articulos/el-futuro-del-agua-es-la-seguridad-hidrica>

UNESCO. (2023). *United Nations World Water Development Report 2023*.

United Nations. (s. f.). ¿Qué es el cambio climático? | *Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>

UN-Habitat. (2020). *Water and sanitation in the world's cities: Adapting to climate change*.

UN-Habitat. (2024). *Water, lifeblood of sustainable cities* | *UN-Habitat*. <https://unhabitat.org/news/Water-lifeblood-sustainable-cities>

Un-Water. (2022, 8 septiembre). What is Water Security? Infographic | UN-Water. *UN-Water*. <https://www.unwater.org/publications/what-water-security-infographic>

Vialle, C., Sablayrolles, C., Lovera, M., Jacob, S., Huau, M. C., & Montrejaud-Vignoles, M. (2011). Monitoring of water quality from green roofs: Comparison with conventional roofs. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2035–2042. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.028>

World Bank. (s. f.). *Agua: Panorama general*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>

World wildlife fund [WWF]. (s. f.). *Agua*. WWF. https://www.wwf.org.co/que_hacemos/agua/

Yaziz, M. I., Gunting, H., Sapari, N., & Ghazali, A. W. (1989). Variations in rainwater quality from roof catchments. *Water Research*, 23(6), 761–765. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(89\)90211-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(89)90211-X)

Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1-3), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>

Mehrabadi, M. H. R., Saghafian, B., & Fashi, F. H. (2013). Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.015>

Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat). (2020). *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*. UN-Habitat.

Villarreal, E. L., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment*, 40(9), 1174–1184. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.10.018>