



Diseño de un sistema de tratamiento de agua a escala piloto implementando un filtro a base de bagazo de caña para la reducción de dureza en agua de pozo en la zona rural de La Peña, Cundinamarca

Elaborado por:

Valentina Olaya Ortiz

Samuel Alberto Borja Giraldo

Profesora:

Johanna Karina Solano

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Proyecto de Grado de Pregrado

Bogotá, 2025



Tabla de contenido

Lista de tablas	4
Lista de ilustraciones	4
Resumen ejecutivo	5
Introducción	7
1.1. Objetivo general:	10
1.2. Objetivos específicos:	10
2. Definición del problema:	11
3. Justificación	13
4. Análisis de requerimientos	16
5. Marco teórico	19
5.1. Origen y Formación del Agua Subterránea en Acuíferos de Pozo:	19
5.2. Metodologías para el Muestreo de Agua en Pozos Subterráneos.	21
5.3. Normativa	22
5.4. Caracterización Físicoquímica de la Calidad del Agua	24
5.5. Proceso Agroindustrial de Producción de Panela y Caracterización de sus Residuos	25
5.6. Sistemas de tratamiento de agua para uso doméstico	26
5.7. Tipos de filtros existentes en el mercado y materiales de los filtros	29
5.8. Clases de plásticos	31
5.9. Biopolímeros	32
6. Análisis de restricciones	35
6.1. Restricciones Ambientales	35
6.3. Restricciones Legales	38
6.4. Restricciones de Salud y Seguridad	39
6.5. Restricciones Socioculturales	41
7. Metodología para la selección de la solución	41
7.1. Identificación de restricciones y criterios de diseño	42
7.2. Generación de alternativas de solución	42
7.3. Análisis de viabilidad técnica y lógica	43
7.4. Comparación con soluciones existentes	44
7.5. Evaluación y selección de la alternativa más viable	45
7.6. Ajuste del diseño	45
7.7. Consideraciones económico-sociales y sostenibilidad	46
8. Metodología para el desarrollo de la solución	47
9. Plan de implementación y Resultados	50



9.1.	Preparación del bagazo	50
9.2.	Activación química	50
9.3.	Toma de la muestra	51
9.4.	Diseño del sistema de tratamiento.....	53
9.5.	Creación del prototipo de filtro	55
9.6.	Caracterización del agua	58
9.6.1.	Agua de entrada (Agua dura).....	58
9.6.2.	Agua de salida (Agua filtrada).....	61
9.7.	Eficiencia en la remoción de dureza	62
10.	Análisis de costos	63
10.1	Análisis de costos del prototipo académico	66
10.2	Análisis de costos del sistema aplicado en la finca	67
11.	Conclusión	69
12.	Referencias	72



Lista de tablas

Tabla 1. Sistemas de tratamiento de agua.....	26
Tabla 2. Tipos de filtros utilizados para tratamiento de agua.....	29
Tabla 3. Materiales utilizados en filtros de tratamiento.....	30
Tabla 4. Plásticos más utilizados en sistemas de filtración y conducción de agua.....	32
Tabla 5. Aplicación de biomateriales en sistemas de filtración de agua.....	33
Tabla 6. Metodología de desarrollo de la solución.	47
Tabla 9. Estructura del filtro (Prototipo).	55
Tabla 10. Estructura del filtro (Aplicado a la realidad).	56
Tabla 11. Tabla de resultados Agua Dura.	58
Tabla 12. Tabla de resultados Agua Filtrada.	61
Tabla 7. Análisis de costos (Prototipo).	63
Tabla 8. Análisis de costos (Proyecto aplicado).	65

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Preparación del bagazo.....	50
Ilustración 2. Activación química del Bagazo y Lavado.....	51
Ilustración 3. Toma de la muestra.	52
Ilustración 4. Sistema de tratamiento 3D.	53
Ilustración 5. Filtro (Prototipo).....	56
Ilustración 6. Diseño 3D del filtro.	58
Ilustración 7. Muestra 1 sin tratar.	58
Ilustración 8. Muestra 2 sin tratar.	59
Ilustración 9. Muestra 1 filtrada	61
Ilustración 10. Muestra 2 filtrada	61



Resumen ejecutivo

Este proyecto investigativo tiene como propósito diseñar un sistema de tratamiento a escala piloto para agua de pozo basado en un filtro creado a partir de bagazo de caña de azúcar (Actualmente considerado un residuo) con el objetivo de reducir la dureza total del agua, este será aplicado en la vereda El Cabuyal, zona rural del municipio de La Peña, Cundinamarca.

El primer paso realizado para llevar a cabo el proyecto fue la caracterización fisicoquímica del agua de pozo, la recolección y tratamiento del bagazo, y, por último, la creación en laboratorio de un filtro de lecho con cinco capas: grava gruesa, arena, bagazo activado, algodón y grava fina. El bagazo fue sometido a un proceso de limpieza y activación química con ácido cítrico al 5%, tratamiento que mejoró su capacidad de adsorber iones de magnesio y calcio (Los causantes de la dureza en el agua). Se realizaron pruebas de filtración con las muestras de agua recolectadas de los pozos y tanques de almacenamiento en la finca de la familia Ortiz, midiendo la dureza antes y después del tratamiento mediante titulación con el reactivo EDTA.

El filtro (Prototipo) mostró una remoción significativa de la dureza total presente en el agua, y el sistema final proyectado incluye tanques de sedimentación, almacenamiento y estructuras en PVC, todo pensado para operar por gravedad, sin requerir electricidad. Además, se realizó una estimación de costos para lograr aplicar el sistema en las comunidades rurales de Colombia, destacando el aprovechamiento de residuos



agroindustriales y su alineación con los principios de sostenibilidad y economía circular.

La investigación concluye que el filtro a base de bagazo es una alternativa viable, según las características económicas y ecológicas en comparación a los métodos tradicionales del tratamiento de agua dura. Así mismo, su implementación en zonas rurales podría mejorar el acceso a agua de mejor calidad, reducir el impacto ambiental y promover alternativas sostenibles adaptadas a contextos locales.



Introducción

El agua es un recurso fundamental para la vida y su calidad impacta directamente en la salud pública, el desarrollo económico y el bienestar social (Carrasco, 2011). En Colombia, muchas comunidades rurales no cuentan con acceso a agua potable y dependen del agua de pozo, la cual suele presentar altos niveles de dureza debido a la presencia de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) (Alonso, 2015). La dureza del agua no solo afecta el consumo humano, sino que también disminuye la eficiencia de los detergentes, favorece la formación de incrustaciones en tuberías y electrodomésticos, y puede contribuir a la formación de cálculos renales en poblaciones susceptibles (Reyes, 2019).

La dureza del agua es una problemática común en regiones donde predominan formaciones geológicas ricas en carbonatos y sulfatos, lo que provoca que el agua de pozo contenga elevadas concentraciones de estos compuestos (Torres et al., 2017). Su uso prolongado puede generar complicaciones en la infraestructura doméstica e industrial, afectando el desempeño de calderas, calentadores de agua y sistemas de distribución, debido a la acumulación de depósitos minerales (Cruz et al., 2005). Además, la dureza del agua tiene implicaciones económicas, ya que incrementa el consumo de detergentes y reduce la vida útil de los equipos que utilizan agua en sus procesos (Nguyen et al., 2018).

Los métodos convencionales para reducir la dureza del agua incluyen la ósmosis



inversa, el uso de resinas de intercambio iónico y el empleo de ablandadores químicos. Sin embargo, estos sistemas suelen ser costosos y poco accesibles para comunidades rurales con recursos limitados (Boguniewicz y Capodaglio, 2017). En este contexto, se plantea el desarrollo de un sistema de filtración de bajo costo, utilizando bagazo de caña de azúcar como material adsorbente, aprovechando su capacidad para retener iones de calcio y magnesio (Jiménez et al., 2019).

El bagazo de caña de azúcar es un subproducto abundante en la agroindustria panelera y su aprovechamiento como material filtrante representa una alternativa sostenible dentro de la economía circular (García & Torres, 2021). Investigaciones previas han demostrado que este material tiene propiedades adsorbentes efectivas para la retención de metales pesados y contaminantes en soluciones acuosas, lo que sugiere su potencial para reducir la dureza del agua (Palansooriya et al., 2020). Además, su implementación en comunidades rurales permitiría reducir costos en tratamientos convencionales, promoviendo una solución viable y de fácil acceso.

El objetivo de este proyecto es diseñar un sistema de tratamiento de agua a escala piloto basado en un filtro elaborado con residuos agroindustriales, que sea sostenible, accesible y eficiente para la reducción de la dureza en el agua de pozo de la zona rural de La Peña, Cundinamarca. Para ello, se realizará la caracterización del agua, la fabricación del filtro y su posterior evaluación en pruebas experimentales, con el fin de analizar su eficacia y viabilidad en el contexto rural colombiano.



Este estudio contribuirá a la generación de conocimiento sobre alternativas sostenibles para el tratamiento del agua en zonas con acceso limitado a tecnologías convencionales, promoviendo la reutilización de residuos agroindustriales y fomentando la aplicación de soluciones ambientales innovadoras. Además, busca generar conciencia sobre la importancia de sistemas de tratamiento accesibles para comunidades vulnerables, reduciendo el impacto ambiental de métodos tradicionales y ofreciendo una alternativa que puede ser replicada en otras regiones con problemas similares.



1. Objetivo

1.1. Objetivo general:

Diseñar un sistema de tratamiento a escala piloto para agua de pozo utilizando un filtro elaborado a partir de residuos (Bagazo) de la producción de panela, con el fin de reducir la concentración de dureza total presente en el agua mejorando su calidad para riego, lavado y actividades domesticas de limpieza, considerando como caso de estudio la finca de la familia Ortiz, ubicada en la vereda El Cabuyal en el municipio de La Peña, Cundinamarca.

1.2. Objetivos específicos:

1. Caracterizar el agua de pozo en la finca de La Peña, Cundinamarca, mediante análisis fisicoquímicos con el fin de determinar los parámetros de calidad y definir el sistema de tratamiento más adecuado.
2. Elaborar un filtro basado en residuos de la producción de panela, evaluando su capacidad de remoción de dureza, magnesio y microorganismos mediante pruebas experimentales y análisis de calidad del agua.
3. Diseñar un sistema de tratamiento de agua de pozo que incorpore un filtro a base de residuos de la producción de panela para su uso doméstico y riego en la finca, caso de estudio.
4. Evaluar la viabilidad técnica del sistema de tratamiento diseñado, considerando su eficiencia en la reducción de dureza, costos de implementación y potencial aplicabilidad para su uso doméstico y en tareas de riego en la finca.



2. Definición del problema:

El agua es un recurso esencial para la vida, y su calidad influye directamente a la salud pública, el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental especialmente en las zonas rurales de Colombia, donde la contaminación del recurso hídrico representa un problema que se da tanto a nivel doméstico como a nivel industrial (Carrasco, 2011). Una de las principales características del agua dura, es que tiene magnesio (Mg^{2+}) calcio (Ca^{2+}) en altas concentraciones, lo que causa inconvenientes en la calidad de vida de la población de la zona rural de La Peña (Alonso, 2015).

El problema se agrava en zonas donde no se tiene acceso al suministro de agua potable, lo que obliga a las comunidades a utilizar agua dura proveniente de pozos y aguas lluvias para sus actividades domésticas. Esto no solo impacta la calidad de vida de las personas, sino que también dificulta el mantenimiento general de sus hogares, cultivos, empresas y negocios debido a la acumulación de incrustaciones calcáreas. Además, los métodos de tratamiento convencionales como el uso de resinas de intercambio iónico, ablandadores químicos y sistemas de ósmosis inversa, suelen ser costosos, de mantenimiento complejo y poco sostenibles a largo plazo, lo cual los hace poco accesibles para las comunidades rurales y, en especial aquellas de bajos recursos.

Por otro lado, el uso excesivo del agua dura tiene efectos negativos reduciendo la eficiencia de los detergentes, dificultando la formación de espuma y generando



incrustaciones en tuberías y electrodomésticos como las lavadoras, asimismo, puede alterar el sabor de los alimentos al cocinar. Fuera de esto, el consumo de agua con una alta dureza durante tiempos prolongados puede generar implicaciones en la salud que, aunque no necesariamente son graves puede causar cálculos renales en algunas personas susceptibles (Reyes, 2019).

En este contexto es necesario crear un método económico y viable para zonas rurales como algunas comunidades de La Peña, Cundinamarca, las cuales se han visto afectadas por el problema del agua dura en sus fuentes hídricas principales.



3. Justificación

El diseño de un sistema de tratamiento de agua de pozo para uso doméstico e incluso consumo humano enfocado en el desarrollo de un filtro de agua creado con los residuos generados en el proceso de fabricación de panela trae múltiples beneficios de sostenibilidad gracias a su componente de innovación. Este podría facilitar la accesibilidad al recurso hídrico y mejorar la eficiencia en el tratamiento del agua. La propuesta responde a la necesidad de encontrar soluciones que sean viables económica y ambientalmente, de la misma manera que garantiza un acceso más equitativo a agua de calidad para diversas comunidades rurales.

El uso del bagazo de la caña de azúcar como material base para la creación del filtro, y las prácticas económicas para el diseño e implementación de un sistema de tratamiento en áreas rurales promueve un enfoque hacia la economía circular debido al aprovechamiento de un subproducto abundante en la agroindustria. En lugar de convertirse en desecho, el bagazo se transforma en un insumo para la purificación del agua, lo que contribuye a la reducción de residuos y a la valorización de biomateriales (Jiménez et al., 2019).

Además, el diseño de un sistema de tratamiento puede promover la participación tanto de la comunidad como del gobierno en la mejora de la salud pública. Considerando que las propiedades de adsorción del filtro permiten retener iones de calcio y magnesio, principales responsables de la dureza del agua, se refuerza la relevancia de esta investigación en los procesos de tratamiento hídrico.



Desde una perspectiva económica, el diseño del sistema y la creación del pueden ser una alternativa asequible para la comunidad frente a los sistemas convencionales de tratamiento de agua dura, como la ósmosis inversa o los ablandadores de resinas de intercambio iónico. Estos sistemas suelen tener costos elevados de adquisición y el mantenimiento, debe realizarse periódicamente y hacerse por un técnico con el conocimiento adecuado lo que dificulta su implementación en comunidades de bajos recursos (Boguniewicz y Capodaglio, 2017). En contraste, un filtro a base de bagazo de caña y otros materiales reciclables ofrece una opción de bajo costo, lo que facilita su adopción en entornos rurales y urbanos donde los recursos son limitados.

Desde el punto de vista ambiental, el uso de un sistema de tratamiento económico y la creación de un filtro duradero y reciclable contribuye a la reducción de impactos negativos asociados a la contaminación del suelo, el uso excesivo de productos químicos en el tratamiento de agua, aumento de la presión sobre el relleno sanitario y la propagación de plagas debido a la descomposición de los residuos orgánicos generados. Muchos de los métodos convencionales generan residuos secundarios que requieren un manejo especializado, mientras que un filtro basado en biomateriales podría reducir la huella de carbono del proceso de purificación (Nguyen et al., 2018).

Por último, uno de los beneficios más significativos de la propuesta es su



contribución a la innovación y desarrollo tecnológico en el sector del tratamiento del agua. La exploración de materiales biodegradables y amigables con el medio ambiente crean una alternativa que permite ampliar el conocimiento sobre soluciones sostenibles para la remoción de dureza en el agua. Al demostrar la efectividad de este biomaterial, se abre la puerta a futuras investigaciones sobre el uso de otros subproductos agrícolas en procesos de purificación (García & Torres, 2021). Este enfoque no solo impulsa la investigación científica para ayudar a las comunidades de zonas rurales, sino que también fomenta la autonomía tecnológica y el desarrollo de soluciones locales adaptadas a las necesidades específicas de cada región.



4. Análisis de requerimientos

El desarrollo adecuado de un sistema de tratamiento de agua basado en un filtro de bagazo de caña se sustenta en una adecuada planificación y definición de condiciones y características del sistema donde se puede cumplir y satisfacer las necesidades del usuario, esto con el fin de lograr los objetivos de la investigación. El cumplimiento de los objetivos, en los plazos estipulados y con la satisfacción de las necesidades funcionales, es esencial para garantizar un diseño eficiente y sostenible.

Para llevar a cabo el proyecto de manera efectiva, es fundamental cumplir con los siguientes aspectos:

- Definición de objetivos: Establecer de manera clara, específica y medible las metas y objetivos del proyecto con el fin de garantizar que el diseño del sistema cumpla con la reducción de dureza del agua de pozo en la zona rural de La Peña, Cundinamarca.
- Gestión de recursos: Asegurar la disponibilidad de materiales, equipos y financiamiento para la ejecución del proyecto, así como hacer un correcto uso y gestión del tiempo y espacios brindados por la universidad para realizar la parte práctica del proyecto.
- Evaluación técnica y científica: Realizar pruebas de laboratorio y ensayos piloto para validar la eficiencia del sistema y el filtro antes de su implementación a mayor escala.
- Cumplimiento normativo: Asegurar que el diseño y operación del sistema cumplan con la normativa legal vigente en materia de calidad del agua y



tratamiento de esta.

- Sostenibilidad: Evaluar el impacto ambiental y económico del sistema para garantizar su viabilidad a largo plazo.

El objetivo principal del sistema de tratamiento es reducir la dureza del agua de pozo en la zona rural de La Peña, Cundinamarca, mediante el diseño de un sistema de tratamiento de agua y la implementación de un filtro a base de bagazo de caña. Este sistema debe ser eficiente, sostenible y de bajo costo, para lograr que su aplicación en entornos rurales donde los recursos son limitados sea posible. Además, su operación y mantenimiento deben poder realizarse fácilmente por parte de la comunidad local, asegurando la mejora en la salud pública y la calidad del agua potable.

Para garantizar la efectividad del sistema, se deben verificar y establecer los siguientes parámetros de diseño:

- Capacidad de filtración: Determinar el volumen de agua que el sistema podría filtrar diariamente.
- Eficiencia de remoción: Comprobar la capacidad del filtro para reducir los niveles de dureza del agua a valores dentro de los límites permisibles por normativas nacionales.
- Durabilidad del material filtrante: Evaluar la resistencia del bagazo de caña a lo largo del tiempo y su capacidad de adsorción tras ciclos continuos de uso.
- Requerimientos sanitarios: Cumplir con la normatividad legal vigente.



Para lograr una estimación adecuada de las características de diseño del sistema de tratamiento y el filtro de remoción es necesario tener unas especificaciones del producto:

- Dimensiones del sistema de tratamiento y del filtro: Que sean óptimas para permitan un adecuado flujo y tiempo de contacto del agua con el material filtrante.
- Capacidad de adsorción (filtro): Estimar la cantidad de iones de calcio y magnesio que el bagazo de caña puede retener por unidad de masa.
- Tiempo de vida útil (Filtro): Proyectar la durabilidad del filtro antes de requerir un reemplazo del material filtrante.
- Frecuencia de mantenimiento: Establecer protocolos de limpieza y reemplazo para asegurar la eficiencia del sistema.
- Rendimiento hídrico: Calcular la cantidad de agua tratada por hora, asegurando que cumpla con las necesidades diarias de la población.



5. Marco teórico

El acceso al agua potable es un derecho fundamental y un factor clave para el bienestar humano, el desarrollo sostenible y la conservación ambiental. Sin embargo, en muchas regiones del mundo, especialmente en zonas rurales, la disponibilidad de agua de calidad es limitada debido a múltiples factores, incluyendo la geología local, la contaminación y la falta de infraestructuras adecuadas para su tratamiento. La necesidad de implementar tecnologías accesibles y sostenibles para el tratamiento del agua ha llevado a la exploración de métodos innovadores que permitan mejorar su calidad sin generar impactos ambientales negativos o costos elevados para las comunidades. En este contexto, la investigación sobre fuentes de agua, su caracterización y los procesos de tratamiento juegan un papel esencial en la búsqueda de soluciones efectivas y adaptadas a las condiciones locales.

5.1. Origen y Formación del Agua Subterránea en Acuíferos de Pozo:

Según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia (2020), las aguas subterráneas provienen de la infiltración en el terreno de las aguas lluvias o de lagos y ríos, que después de pasar la franja capilar del suelo, circulan y se almacenan en formaciones geológicas porosas o fracturadas, denominadas acuíferos.

Los acuíferos desempeñan un papel fundamental como conductores de las aguas desde sus zonas de recarga hasta lagos, ríos, manantiales, pantanos, captaciones construidas por el hombre. Además, actúan como almacenadores de estos recursos que posteriormente pueden ser aprovechados para satisfacer las necesidades



de abastecimiento de sus usuarios (CEDEX, 2007). Existen básicamente tres tipos de acuíferos: los acuíferos libres, confinados y semiconfinados.

Los acuíferos libres son generalmente someros, donde el agua se encuentra rellenando poros y fisuras por acción de la gravedad. La superficie hasta dónde llega el agua se denomina superficie freática, y en los pozos se conoce como nivel freático (Ordoñez Gálvez, 2011). Por otro lado, en los acuíferos confinados, el agua se encuentra a presión entre capas impermeables. Si se extrae agua de ellos, no queda ningún poro vacío, sino que se reduce la presión que colabora con la sustentación de los materiales, lo que podría, en casos extremos, provocar asentamientos del terreno. La superficie virtual que se formaría si se perforaran infinitos pozos se denomina superficie piezométrica, y dentro de un pozo se le conoce como nivel piezométrico (IDEAM, 2024).

Existen también los acuíferos semiconfinados, cuando las capas que los limitan son delgadas o semipermeables. La elección del tipo de captación dependerá tanto de las características hidrogeológicas de la zona, como de las necesidades de abastecimiento y de las condiciones socioeconómicas de la región (CORPOCESAR, 2014).



5.2. metodologías para el Muestreo de Agua en Pozos Subterráneos.

Los pozos profundos, aljibes y manantiales son las formas más comunes de acceder al agua subterránea. Los pozos profundos requieren técnicas especializadas de perforación y suelen llegar a grandes profundidades. En cambio, los aljibes son excavaciones poco profundas, muchas veces manuales y revestidas en piedra, ladrillo o cemento. Los manantiales, por su parte, son exposiciones naturales del agua subterránea que aflora en la superficie, siendo aprovechados directamente sin necesidad de grandes obras (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2011).

Una de las principales ventajas del agua subterránea es su buena calidad natural, ya que se encuentra protegida por capas de suelo o roca que actúan como filtros, reteniendo o atenuando contaminantes, además de estar menos expuesta a las variaciones del clima y la contaminación superficial (EPA, 2024).

El muestreo de agua subterránea es un procedimiento clave para evaluar la calidad del agua y determinar la presencia de contaminantes. Existen diversas metodologías utilizadas para garantizar la obtención de muestras representativas, las cuales varían según el tipo de estudio, los objetivos y las condiciones del acuífero. Algunos de los métodos más comunes incluyen el muestreo puntual, el muestreo compuesto y el muestreo en serie (APHA, 2017). El muestreo puntual consiste en la recolección de una única muestra en un momento específico y en un solo punto del pozo. Este método es útil para estudios preliminares y monitoreos básicos, pero puede no ser representativo de las variaciones en la calidad del agua a lo largo del tiempo (US



EPA, 2013).

El muestreo compuesto implica la recolección de múltiples muestras en diferentes momentos o profundidades del pozo, las cuales se combinan para obtener un análisis más representativo. Este método es utilizado en estudios de variabilidad temporal de contaminantes y calidad del agua en pozos profundos (ISO, 2015). El muestreo en serie se realiza extrayendo muestras a diferentes profundidades del pozo, lo que permite evaluar la estratificación de los contaminantes dentro del acuífero. Este método es esencial en estudios hidrogeológicos avanzados y en la identificación de fuentes de contaminación subterránea (WHO, 2011).

Además, el muestreo de agua subterránea debe seguir protocolos estrictos para evitar la contaminación cruzada y garantizar la precisión de los resultados. Entre las recomendaciones se incluyen el uso de envases estériles, la preservación adecuada de las muestras y el transporte en condiciones controladas de temperatura y protección contra la luz (Standard Methods, 2017).

5.3. Normativa

En Colombia, el tratamiento de aguas subterráneas está regulado por diversas normativas que establecen los criterios de calidad y los procedimientos que deben aplicarse para garantizar su uso seguro. La principal regulación es el Decreto 1575 de 2007, el cual establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano, determinando los estándares que deben cumplir las fuentes



de abastecimiento, incluyendo las aguas subterráneas (Ministerio de Salud y Protección Social, 2007).

La Resolución 2115 de 2007 complementa esta normativa, definiendo los valores máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en el agua para consumo humano. En esta resolución, se establecen límites específicos para la dureza total del agua, los cuales no deben superar los 500 mg/L en términos de carbonato de calcio (CaCO_3), para evitar efectos adversos en la salud y problemas operacionales en sistemas de distribución (Ministerio de Salud y Protección Social, 2007).

Además, la Ley 373 de 1997 promueve el uso eficiente y ahorro del agua, incentivando la implementación de tecnologías sostenibles para su tratamiento. En este contexto, el uso de materiales alternativos, como el bagazo de caña de azúcar en procesos de filtración, se alinea con la normativa ambiental y los principios de economía circular promovidos en el país (Congreso de Colombia, 1997).

Asimismo, la normatividad colombiana se encuentra alineada con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), las cuales establecen que el tratamiento de la dureza del agua debe considerar estrategias sostenibles que minimicen la generación de residuos secundarios y reduzcan el uso de productos químicos (OMS, 2017).



5.4. Caracterización Físicoquímica de la Calidad del Agua

El agua subterránea en Colombia es una fuente fundamental de abastecimiento, especialmente en zonas rurales donde no existen sistemas de acueducto desarrollados. Su calidad depende en gran medida de la geología del terreno, la profundidad del acuífero y las actividades humanas cercanas. En el departamento de Cundinamarca, el agua de pozo suele presentar una variabilidad en sus características físicoquímicas debido a la presencia de formaciones rocosas ricas en carbonatos, lo que contribuye a niveles elevados de dureza (IDEAM, 2021).

Desde el punto de vista físico, el agua de pozo en la región suele ser incolora, inodora e insípida cuando está libre de contaminantes. Sin embargo, en algunos casos puede presentar turbidez debido a la presencia de sólidos en suspensión, los cuales pueden provenir de procesos de infiltración del agua en el suelo o de materiales arrastrados por la extracción (MADS, 2018). La temperatura del agua subterránea en Cundinamarca varía entre 10 y 20°C, dependiendo de la profundidad del pozo y la ubicación geográfica (IDEAM, 2021).

En cuanto a sus características químicas, el agua subterránea en esta región suele contener concentraciones variables de minerales como calcio, magnesio y bicarbonatos, responsables de su dureza. Además, en algunas zonas pueden presentarse niveles elevados de hierro y manganeso, lo que genera problemas de coloración y sabor metálico en el agua (Ministerio de Salud y Protección Social, 2007).



Asimismo, el pH del agua subterránea en Cundinamarca oscila entre 6.5 y 8.5, valores dentro del rango permitido por la normativa colombiana para el consumo humano (MADS, 2018).

5.5. Proceso Agroindustrial de Producción de Panela y Caracterización de sus Residuos

La producción de panela en Colombia es una de las actividades agroindustriales más importantes del sector rural. Este proceso inicia con el cultivo y cosecha de la caña de azúcar, la cual es triturada para extraer su jugo. Posteriormente, el jugo es filtrado para eliminar impurezas y se somete a un proceso de evaporación en hornillas, donde se concentra hasta alcanzar una textura espesa. Finalmente, la melaza se vierte en moldes donde se solidifica para formar bloques de panela (Fedepanela, 2020).

Uno de los principales residuos generados en este proceso es el bagazo de caña de azúcar, material fibroso que queda tras la extracción del jugo. Tradicionalmente, este residuo se ha utilizado como combustible en los ingenios paneleros, pero en los últimos años se ha explorado su potencial en aplicaciones industriales y ambientales. Diversos estudios han demostrado que el bagazo de caña posee una estructura porosa que le confiere una alta capacidad de adsorción, lo que lo hace un material idóneo para la filtración y tratamiento de agua (Jiménez et al., 2019).

El aprovechamiento del bagazo de caña para la elaboración de filtros de agua representa una estrategia sostenible que contribuye a la reducción de residuos



agroindustriales y al desarrollo de tecnologías de bajo costo. Investigaciones han demostrado que el tratamiento térmico o químico del bagazo mejora su capacidad de adsorción, permitiéndole capturar metales pesados, materia orgánica y reducir la dureza del agua (Palansooriya et al., 2020). De esta manera, su implementación en sistemas de purificación de agua podría ser una alternativa viable en comunidades rurales con acceso limitado a fuentes de agua tratada.

5.6. Sistemas de tratamiento de agua para uso doméstico

El acceso a agua potable y para uso doméstico es un derecho fundamental y un requerimiento básico para mejorar la salud de las poblaciones. El tratamiento y potabilización del agua implica la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar diferentes contaminantes y garantizar que el agua sea segura para el consumo humano. Debido a esto, los sistemas de tratamiento de agua desempeñan un papel crucial en comunidades rurales con acceso limitado a redes de acueducto y donde la calidad del agua es deficiente (Ramos et al., 2020).

Los sistemas de tratamiento de agua de procesos domésticos varían en complejidad y eficiencia. Dentro de los sistemas o métodos más utilizados se encuentran los compilados en la siguiente tabla:

Tabla 1. Sistemas de tratamiento de agua

Método	Descripción	Aplicación en comunidades rurales	Referencia
Filtración mecánica	Utiliza medios físicos como arena, grava y membranas para remover partículas y	Buena alternativa para comunidades con acceso limitado a tratamiento	(Torres et al., 2017)



Método	Descripción	Aplicación en comunidades rurales	Referencia
	sedimentos.	avanzado.	
Adsorción con carbón activado	Elimina compuestos orgánicos, cloro y algunos metales pesados. Reduce la necesidad de desinfectantes como dióxido de cloro.	Aplicado en plantas potabilizadoras; adaptable a escalas pequeñas.	(Sorlini et al., 2015)
Coagulación y floculación	Adición de agentes químicos como sulfato de aluminio o alumbre para formar flóculos y sedimentar impurezas.	Aplicado con éxito en comunidades rurales para mejorar la calidad del agua.	(Torres et al., 2017)
Desinfección química	Aplicación de cloro para eliminar patógenos. Método más común por su efectividad.	Uso de micro dosificación ha demostrado reducir contaminación microbiológica.	(Cruz et al., 2005)
Radiación ultravioleta	Inactiva microorganismos sin uso de químicos mediante luz UV.	Implementado en algunas comunidades rurales con buenos resultados.	(Sánchez y Quiroga, 2025)
Ósmosis inversa	Elimina sales disueltas, metales pesados y microorganismos con una membrana semipermeable.	Alta eficiencia, pero costoso y requiere mantenimiento; difícil sin apoyo institucional.	(Ramos et al., 2020)
Biofiltración	Utiliza microorganismos benéficos para degradar materia orgánica y eliminar contaminantes.	Ha mostrado buenos resultados en comunidades rurales sin acceso a tratamiento convencional.	(Palansooriya et al., 2020)

Fuente: Autores

Sin embargo, la efectividad de estos métodos y la implementación de sistemas de tratamiento doméstico enfrenta diversos desafíos en cuanto a la accesibilidad económica ya que muchos sistemas de tratamiento requieren una inversión inicial elevada, lo que limita su aplicación en comunidades de bajos recursos. En sinergia con



lo anterior, la adopción y el mantenimiento de los sistemas requiere conocimientos técnicos y de acceso a repuestos que puede comprometer la eficacia de los sistemas a largo plazo (Sánchez y Quiroga, 2025).

Algunas de estas tecnologías, como la ósmosis inversa, generan residuos que requieren una gestión adecuada para su posterior disposición final, lo que causa que la implementación de estos tratamientos se vuelva más complicada, sobre todo en las zonas rurales, en las cuales apenas hay una gestión de residuos. Por ello se busca crear alternativas más sostenibles, que van de la mano con la biofiltración y el uso de materiales naturales, los cuales han demostrado resultados prometedores en la reducción de los impactos ambientales del tratamiento de agua (Palansooriya et al., 2020).

A su vez, muchas zonas rurales tienen una deficiencia de infraestructura, lo que hace que la distribución del agua tratada sea más complicada y no se logre implementar un sistema más eficiente, en muchos casos es necesario mejorar la infraestructura y garantizar la capacitación de la comunidad en el uso y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de agua (Cruz et al., 2005).

Dificultad que podría causar inquietudes dentro de la comunidad ya que la adopción de nuevas tecnologías depende en gran medida de la aceptación y la concientización sobre los beneficios que podrían traer estos sistemas siendo un proceso clave para una implementación exitosa (Sánchez y Quiroga, 2025).



5.7. Tipos de filtros existentes en el mercado y materiales de los filtros

El tratamiento del agua para consumo es una necesidad que se ha visto en aumento a nivel mundial, y una de las principales tecnologías empleadas para dicho propósito son los filtros de agua. En el mercado existen una gran variedad de filtros que responden a la variabilidad en las características del agua, los contaminantes y los requerimientos de calidad del agua tratada. En este apartado se describen los principales tipos de filtros disponibles y los materiales que son utilizados en su fabricación.

Tabla 2. Tipos de filtros utilizados para tratamiento de agua.

Tipo de filtro	Descripción y funcionamiento	Aplicaciones y observaciones	Referencia
Filtros de arena y grava	Proceso mecánico y biológico: partículas quedan retenidas y microorganismos degradan contaminantes.	Utilizados en aguas residuales y abastecimiento doméstico.	(Chulluncuy, 2011)
Filtros de carbón activado	Eliminan compuestos orgánicos volátiles, químicos, mejoran sabor y olor. Adsorción a partir de residuos como coco, caña o café.	Alta eficacia en sistemas domésticos y comunitarios.	(Landin y Tovar, 2017)
Filtros de cerámica	Materiales porosos que retienen microorganismos y partículas. Posibilidad de combinar con plata coloidal, carbón activado o magnetización.	Muy usados en zonas rurales sin acceso a agua potable.	(Yusuf y Murtala, 2020) / (Córdoba et al., 2016)
Filtros biológicos	Uso de microorganismos adheridos a medios como conchas marinas para	Alta eficiencia en remoción de sólidos y materia	(Galindo et al., 2016)



Tipo de filtro	Descripción y funcionamiento	Aplicaciones y observaciones	Referencia
	degradar materia orgánica.	orgánica.	
Filtros de membrana	Separación avanzada por tamaño de partícula: micro, ultra, nano, ósmosis inversa. Posible mejora con tratamientos magnéticos.	Alta eficiencia, pero alto costo y difícil mantenimiento.	(Kabir et al., 2020) / (MENA Report, 2024)

Fuente: Autores

De la misma manera que existen gran variedad de filtros en el mercado, también hay muchos materiales con los que estos se realizan.

Tabla 3. Materiales utilizados en filtros de tratamiento

Tipo de material	Origen / Naturaleza	Aplicación principal en filtros	Referencia
Arena y grava	Naturales	Filtros de lecho profundo para remoción de sólidos y turbidez.	(Sanhueza et al., 2011)
Zeolitas	Minerales naturales	Alta capacidad de intercambio iónico, útil en remoción de metales pesados y dureza del agua.	(Cucarella y Renman, 2009)
Conchas marinas	Naturales (residuos marinos)	Material de soporte en filtros biológicos. Alta eficiencia en degradación de materia orgánica.	(Galindo et al., 2016)
Carbón activado	Sintético o reciclado (coco, caña, café)	Adsorción de contaminantes químicos, mejora de sabor y olor.	(Landin y Tovar, 2017)
Membranas sintéticas	Polímeros (polisulfona, poliamida)	Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.	(Kabir et al., 2020)
Ladrillos triturados y	Derivados industriales /	Filtros de adsorción para sólidos suspendidos y	(Helguera, 2017)



Tipo de material	Origen / Naturaleza	Aplicación principal en filtros	Referencia
cerámica	arcilla	contaminantes.	
Materiales compuestos y emergentes	Combinación de cerámica, carbón activado, magnetismo, etc.	Mejora en eficiencia y sostenibilidad. Alternativas ambientales y de economía circular.	(Yusuf y Murtala, 2020) / (Kabir et al., 2020) / (Ortega et al., 2020)

Fuente: Autores

5.8. Clases de plásticos

El uso de plástico en los procesos de filtración ha sido relevante debido a la resistencia química, bajo costo y facilidad de fabricación que brindan a los sistemas. En la industria del tratamiento de agua, el plástico se emplea tanto en la estructura de los filtros como en las boquillas y membranas filtrantes. Para ello se conocen varios tipos de materiales y propiedades que deben tener los plásticos.

Existen cuatro propiedades claves que hacen que un material sea más adecuado que otro, la resistencia química que es la capacidad del material para soportar exposición a sustancias químicas sin degradarse. La resistencia mecánica que es la capacidad de soportar presiones de filtración sin deformarse. La baja absorción de agua la cual evita alteraciones en su estructura y funcionamiento. Y por último la compatibilidad con normativas sanitarias las cuales ayudan a tener plásticos más seguros para el agua potable (Gutiérrez y Espinoza, 2020).



Tabla 4. Plásticos más utilizados en sistemas de filtración y conducción de agua

Plástico	Características principales	Aplicaciones en filtración o sistemas hidráulicos	Referencia
HDPE (Polietileno de alta densidad)	Alta resistencia química y mecánica, bajo costo, durabilidad.	Carcasas de filtros, tuberías en instalaciones hidráulicas.	(Vilcarin Salcedo, 2019)
Polipropileno (PP)	Resistencia química y térmica, liviano, fácil de fabricar.	Fabricación de membranas filtrantes y cartuchos para uso industrial y doméstico.	(Vilcarin Salcedo, 2019)
PVC (Policloruro de vinilo)	Económico, resistente, fácil de manipular.	Tuberías y componentes de filtración, con requisitos sanitarios para agua potable.	(Vilcarin Salcedo, 2019)
PES (Polietersulfona)	Alta estabilidad térmica y química.	Membranas para eliminar microorganismos en la industria farmacéutica y tratamiento de agua.	(MENA Report, 2022)
PTFE (Teflón o politetrafluoro etileno)	Material inerte, alta resistencia química.	Membranas de filtración de alta pureza.	(MENA Report, 2022)

Fuente: Autores

5.9. Biopolímeros

La eficiencia en el tratamiento de aguas y la preocupación por la sostenibilidad han generado que se incremente el desarrollo y la aplicación de tecnologías basadas en biomateriales. Estos materiales, derivados de la naturaleza que suelen ser biodegradables, representan una alternativa ecológica y en la mayoría de los casos viable frente a los materiales convencionales utilizados en sistemas de filtración.



Los biopolímeros sobresalen por su biodegradabilidad, bajo impacto ambiental y por la capacidad para ser modificados y adaptados en diferentes aplicaciones.

Tabla 5. Aplicación de biomateriales en sistemas de filtración de agua

Material/Biomaterial	Aplicación y Beneficios	Referencia
Biopolímeros de residuos agroindustriales	Utilizados para fabricar materiales filtrantes. Ejemplo: residuos de jitomate con propiedades fisicoquímicas adecuadas.	(Gómez-Patiño et al., 2018)
Celulosa y derivados	Usados como matriz o refuerzo en materiales compuestos por su biodegradabilidad, abundancia y resistencia mecánica.	(Shaghaleh et al., 2018)
Quitosano y materiales compuestos sostenibles	Remoción de metales pesados como el plomo; bajo costo y sostenibilidad.	(Mohamed et al., 2022)
Luffa, sisal, hidroxiapatita	Alta eficacia en adsorción de tintes, metales y fármacos; materiales económicos y no tóxicos.	(Khadir et al., 2021)
Superficies bioactivas con biopelículas	Formación de películas biodegradables que eliminan contaminantes, especialmente cuando se combinan con adsorbentes como carbón activado.	(Shafahi & Vafai, 2011)
Material compuesto con fibras vegetales	Mayor eficiencia en retención de dureza y eliminación de contaminantes; integración de aditivos como quitosano o nanopartículas de celulosa mejora capacidad de adsorción y vida útil del filtro.	(Basheer et al., 2021)
Diseño híbrido con bagazo de caña y biopolímeros	Propuesta de sistema de tratamiento que integra materiales sostenibles (bagazo, plásticos reciclables y biopolímeros) para mejorar la calidad del agua y reducir el impacto ambiental.	Redacción propia, integradora



Fuente: Autores

El diseño de un sistema de tratamiento de agua basado en un filtro que utiliza materiales sostenibles como el bagazo de caña, plásticos reciclables y biopolímeros, representa una alternativa eficaz a los retos de la contaminación del agua en zonas rurales. La revisión de los tipos de filtros existentes, los materiales plásticos y la aplicación de un biomaterial sugiere que integrar tecnologías híbridas puede incrementar la eficiencia del proceso de filtración, lo cual garantiza una mejor calidad del agua para las comunidades. Además, la aplicación de materiales ecológicos y sostenibles contribuye a la reducción de diferentes impactos ambientales, como la degradación del suelo por residuos o la reducción de la presión al relleno sanitario, alineándose con los principios de desarrollo sostenible y economía circular.



6. Análisis de restricciones

En el proceso de diseño e implementación de un sistema de tratamiento de agua a escala piloto, resulta fundamental realizar un análisis riguroso de las restricciones que podrían condicionar o limitar la viabilidad técnica, económica, legal, social y ambiental del proyecto. Las restricciones en ingeniería son factores determinantes que guían y delimitan el conjunto de soluciones posibles ante un problema, obligando a priorizar alternativas que se adapten al contexto real de intervención.

En el caso particular de este proyecto, que busca reducir la dureza del agua de pozo en la zona rural de La Peña, Cundinamarca, mediante un filtro elaborado a partir de bagazo de caña de azúcar, es indispensable examinar las condiciones del entorno para garantizar no solo la eficiencia del sistema, sino también su sostenibilidad a largo plazo. Este análisis permite identificar barreras externas —como las disposiciones legales, políticas públicas, condiciones del territorio y la percepción comunitaria— así como restricciones internas —vinculadas a la disponibilidad de recursos, infraestructura, tecnología y capacidades locales—.

A continuación, se presentan los principales aspectos que deben considerarse al evaluar las restricciones que influyen en la implementación del proyecto, abordando cada categoría con base en la normativa vigente y el contexto actual colombiano.

6.1. Restricciones Ambientales

El diseño de cualquier sistema de tratamiento de agua debe considerar cuidadosamente sus implicaciones ambientales, tanto durante su instalación como en su operación y mantenimiento. Este proyecto, aunque se basa en materiales de origen



orgánico y de bajo impacto ambiental como el bagazo de caña de azúcar, no está exento de posibles afectaciones al entorno si no se manejan adecuadamente los residuos generados.

En Colombia, los sistemas de tratamiento de agua están regulados por varias normativas que garantizan la protección de los cuerpos hídricos y del entorno. La Resolución 0631 de 2015 establece los límites máximos permisibles para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a sistemas de alcantarillado, por lo que cualquier descarga del agua tratada debe cumplir con estos parámetros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2015). Adicionalmente, la Resolución 1256 de 2021 promueve el reúso de aguas residuales tratadas, estableciendo criterios de calidad y limitaciones para su uso en actividades agrícolas o industriales (MADS, 2021).

Un aspecto ambiental crítico asociado al sistema propuesto es la disposición del material filtrante agotado, es decir, el bagazo de caña que ha sido utilizado tras múltiples ciclos de operación. Aunque este material es biodegradable, después de su uso puede contener altas concentraciones de iones metálicos (principalmente calcio y magnesio), residuos orgánicos del agua cruda e incluso microorganismos atrapados. Si este residuo no se estabiliza ni se dispone adecuadamente, puede generar impactos negativos, como la contaminación del suelo, olores desagradables, proliferación de vectores o lixiviados que alcancen cuerpos hídricos cercanos (Gómez-Patiño et al., 2018).



La normatividad ambiental colombiana exige que este tipo de residuos se manejen bajo principios de prevención, minimización y aprovechamiento, preferiblemente mediante compostaje controlado o uso como acondicionador de suelos no agrícolas, previo análisis de su composición (MADS, 2021). Por tanto, se debe incluir en el plan de implementación comunitaria un protocolo para la gestión ambientalmente responsable del bagazo filtrante, que permita su disposición final segura o su posible valorización.

Este tipo de restricciones no solo responden a exigencias legales, sino que son fundamentales para garantizar que la solución planteada sea realmente sostenible y no transfiera el problema de la contaminación del agua a otro componente del entorno.

6.2. Restricciones Económicas

En el contexto del proyecto siendo este un escenario de prueba piloto, las restricciones económicas no representan una barrera significativa para el diseño ni la implementación del sistema de tratamiento de agua propuesto. A diferencia de otros métodos convencionales como la ósmosis inversa o los ablandadores de resina, esta solución se basa en materiales de bajo costo y alta disponibilidad local, como el bagazo de caña, grava, arena y elementos plásticos reciclables. Estos componentes permiten que el filtro pueda ser replicado fácilmente sin necesidad de inversiones elevadas ni tecnologías complejas, lo cual lo convierte en una opción asequible para comunidades rurales.



No obstante, es importante reconocer que la viabilidad económica de la aplicación del sistema depende en gran medida de las capacidades individuales de cada familia o finca interesada en implementar la tecnología. Aunque el costo del prototipo diseñado para fines académicos incluyó gastos relacionados con transporte, análisis de laboratorio y apoyo logístico de la universidad, el modelo aplicado a la realidad podría construirse con una inversión mínima si se aprovechan los recursos locales y el conocimiento comunitario. Por tanto, la restricción económica no se relaciona con los materiales ni el diseño en sí, sino con la disposición y condiciones particulares de cada usuario para adoptarlo. Esta característica fortalece el enfoque del proyecto, al alinearse con principios de economía circular, equidad social y sostenibilidad en el acceso al agua (García & Torres, 2021; Jiménez et al., 2019).

6.3. Restricciones Legales

El proyecto debe cumplir con las leyes y regulaciones colombianas relacionadas con el tratamiento de aguas y el uso del suelo. La Resolución 0330 de 2017 adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), estableciendo los requisitos técnicos para los sistemas de tratamiento de agua (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

Además, la Ley 2169 de 2021 establece metas para el tratamiento y reúso de aguas residuales urbanas domésticas, lo que podría influir en los objetivos y diseño del proyecto (Congreso de Colombia, 2021).

Es fundamental obtener las licencias y permisos necesarios, como el Plan de



Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) y el permiso de vertimiento, antes de la implementación del proyecto.

6.4. Restricciones de Salud y Seguridad

El sistema de tratamiento diseñado en este proyecto, aunque sencillo y de bajo costo, requiere considerar algunos aspectos clave relacionados con la salud y la seguridad de quienes lo manipulan e implementan. Estas restricciones, si no son abordadas adecuadamente, pueden comprometer tanto la integridad física de los usuarios como la sostenibilidad del sistema en entornos rurales.

En primer lugar, durante la etapa de activación química del bagazo de caña con ácido cítrico al 5%, se requiere precaución en su manipulación. Aunque este compuesto no es considerado altamente peligroso, puede causar irritación ocular o dérmica si no se utilizan guantes, gafas de protección y condiciones de ventilación adecuadas (Agencia Europea de Sustancias Químicas, 2022). Estas condiciones deben replicarse incluso fuera del laboratorio universitario si la comunidad decide tratar el bagazo localmente.

En segundo lugar, si el bagazo no se limpia, seca y desinfecta adecuadamente antes de su encapsulamiento, podría desarrollar microorganismos patógenos o esporas de hongos debido a la humedad, representando un riesgo biológico para las personas que manipulen el filtro sin protección (Gómez Patiño, Cruz Barroso, Perea Flores y Arrieta Báez, 2018).



Otro riesgo potencial está relacionado con la estructura del sistema. El diseño propuesto utiliza materiales plásticos y conexiones hidráulicas que deben ensamblarse cuidadosamente para evitar fugas, desbordamientos o colapsos. Una mala instalación podría generar accidentes domésticos, como caídas por agua acumulada o rotura del soporte estructural, especialmente si el filtro se instala sobre superficies inestables (Espinoza, 2014).

Adicionalmente, es importante advertir que el sistema está diseñado para remover dureza (iones Ca^{2+} y Mg^{2+}), pero no elimina microorganismos patógenos. Por tanto, si se pretende usar el agua filtrada para consumo humano, se debe incluir una etapa de desinfección posterior (como cloración, ebullición o radiación UV), ya que el sistema por sí solo no garantiza potabilidad (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2017).

Por último, la disposición final del bagazo ya utilizado también representa una posible restricción. Este material, después de varios ciclos de uso, podría contener altas cargas de minerales, materia orgánica y microorganismos. Su manipulación sin guantes o su disposición cerca de cultivos o fuentes hídricas puede suponer un riesgo sanitario y ambiental si no se trata como un residuo estabilizado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

En conjunto, estas restricciones no imposibilitan el uso del sistema, pero



requieren protocolos básicos de manejo seguro, buenas prácticas de higiene y capacitación comunitaria para que su implementación sea segura, eficiente y sostenible en el tiempo.

6.5. Restricciones Socioculturales

El proyecto debe considerar las prácticas y creencias culturales de la comunidad de La Peña, Cundinamarca. La participación de las comunidades locales en la gestión ambiental ha sido reconocida por el gobierno colombiano, como se evidencia en el decreto que otorga a las organizaciones indígenas autoridad ambiental sobre sus territorios (El País, 2024).

Es importante involucrar a la comunidad en el diseño e implementación del proyecto, asegurando que sus necesidades y preocupaciones sean consideradas. Esto puede incluir la realización de consultas comunitarias, la educación sobre los beneficios del tratamiento de agua y la adaptación del proyecto a las prácticas culturales locales.

7. Metodología para la selección de la solución

El proceso de selección y desarrollo de una solución para la dureza presente en el agua de la zona rural de La Peña, Cundinamarca, a través del diseño de un sistema de tratamiento basado en un filtro cuyo material principal es el bagazo de caña, se fundamenta en la identificación de una necesidad específica que requiere de una solución alternativa más viable desde el enfoque técnico, económico, social y ambiental. Esta metodología parte del entendimiento de las restricciones del entorno y



del problema anteriormente mencionado, y se estructura en etapas progresivas que garantizan una toma de decisiones fundamentada y coherente con el contexto rural y los objetivos del proyecto.

7.1. Identificación de restricciones y criterios de diseño

En esta etapa se consolidaron las restricciones técnicas, económicas y contextuales que limitaban las posibles soluciones. Algunas de las restricciones más relevantes fueron, los bajos recursos económicos en la comunidad y el municipio, acompañado con un acceso restringido a tecnología avanzada y la constante necesidad de facilidad de operación y mantenimiento. También se ven sumamente afectados por las condiciones climáticas y topográficas del área de implementación.

Estos elementos funcionaron como una base para definir los criterios de selección y las características del sistema de tratamiento y el filtro los cuales requerían tener un buen porcentaje de eficiencia en la reducción de dureza, bajo costo, sostenibilidad y posibilidad de fabricación y operación local.

7.2. Generación de alternativas de solución

Con base a los criterios establecidos se generaron varias alternativas de solución que incluían distintos materiales, configuraciones del sistema y estrategias de encapsulado del bagazo de caña. Las principales alternativas estaban direccionadas a la creación de un filtro de lecho fijo encapsulado el bagazo en bolsas termo encogibles reutilizadas que sería perforadas, un filtro modular con cartuchos de bagazo reemplazables, un biofiltro combinado con zeolita y bagazo activado. También se



consideró crear un sistema de filtración en serie con pretratamiento mecánico, un sistema con homogenización, tratamiento biológico y químico, y, por último el tratamiento químico del agua, sin embargo, estas soluciones eran costosas, difíciles de implementar o no tenían el componente de innovación necesario.

7.3. Análisis de viabilidad técnica y lógica

La evaluación técnica se focalizó en que tan factible es operar el sistema con los recursos disponibles en el contexto rural. Esto incluyó revisar si la alternativa propuesta en el contexto del filtro podía funcionar sin la necesidad de energía eléctrica constante, si los materiales requeridos podían conseguirse a nivel local, y si la estructura del filtro resistiría un uso continuo sin perder eficiencia. Se descartaron soluciones que presentaban incoherencias técnicas o que no cumplen con principios físicos o normativos.

Desde el punto de vista lógico, se analizó que cada propuesta se alinearía de la manera correcta a los principios fundamentales de funcionamiento. Por ejemplo, se evitó considerar cualquier clase de mecanismo que prometieran resultados inalcanzables como la eliminación total de todos los contaminantes sin evidencia experimental, o que implicaran condiciones operativas no viables (como alta presión o temperatura). Además, se confrontaron las propuestas con conocimientos y datos previos obtenidos en investigaciones similares, para identificar discrepancias o confirmar su potencial.



Esta etapa logró depurar el conjunto inicial de ideas y centrarse únicamente en aquellas opciones que fueran técnicamente sólidas, lógicas en su funcionamiento y factibles de implementar en un entorno con limitaciones económicas y tecnológicas.

7.4. Comparación con soluciones existentes

Se investigaron algunas experiencias previas realizadas en comunidades rurales con soluciones parecidas de tratamiento de agua, especialmente aquellas que utilizaron materiales orgánicos como carbón activado, fibras vegetales o filtros biológicos. Por ejemplo, la investigación de Huamán Cuespán (2020) evaluó diferentes residuos orgánicos como aserrín, cascarilla de arroz, cáscara de cacao y bagazo de caña, concluyendo que todos mostraron eficiencias destacables en la remoción de contaminantes, siendo el bagazo una de las alternativas más equilibradas entre eficiencia y disponibilidad.

Adicionalmente, el desarrollo del filtro biodegradable "Filter Caps" por Ogilvy y la Fundación Baylor (Caicedo, 2024) que evidencia el creciente interés en alternativas sostenibles y de bajo costo. Estos filtros, fabricados con tecnología de impresión 3D y resinas de maíz, demostraron una eficiencia notable y una gran aceptación comunitaria en zonas vulnerables de Colombia, lo que refuerza la importancia de desarrollar soluciones accesibles y adaptadas al contexto local.

Dichas alternativas fortalecen la decisión de optar por un sistema que utilice materiales residuales de la industria agronómica como el bagazo de caña, por su



disponibilidad, bajo impacto ambiental y resultados positivos en la retención de contaminantes como los iones de calcio y magnesio.

7.5. Evaluación y selección de la alternativa más viable

Para seleccionar la mejor opción y la alternativa más viable, se realizó un análisis entre las diferentes opciones donde se evaluó a grandes rasgos el costo de implementación y mantenimiento, la facilidad de operación y reemplazo del material filtrante, la eficiencia esperada en la remoción de dureza, impacto ambiental y aprovechamiento de residuos locales, y, por último, la posibilidad de replicación en otras comunidades.

La alternativa seleccionada fue el diseño de un sistema de tratamiento basado en un filtro de lecho fijo con encapsulado del bagazo de caña en un material no permeable que permita el paso del agua con el suficiente tiempo de contacto para la remoción del magnesio y calcio en el agua de pozo.

7.6. Ajuste del diseño

Una vez seleccionada la alternativa más viable, se inició el proceso de diseño ajustando dimensiones, materiales de soporte, cantidad óptima de bagazo por unidad de volumen y protocolos de mantenimiento. Este proceso se realizó mediante pruebas piloto en laboratorio y retroalimentación del entorno local.



7.7. Consideraciones económico-sociales y sostenibilidad

Durante toda la metodología, se priorizó la solución que aportara mayor rentabilidad no solo económica, sino también social y ambiental. Dicha solución permite darles un mayor uso a residuos agroindustriales disponibles localmente, priorizándolo como una alternativa de reducción aportando con la minimización del impacto negativo hacia el suelo, también permite Reducir la dependencia de insumos externos y facilitar la apropiación comunitaria y replicabilidad del proyecto.

En conclusión, esta metodología permitió reducir el gran número posibilidades a una solución concreta, lógica, eficiente y adaptada al contexto, mediante una selección informada basada en criterios técnicos y de sostenibilidad general.



8. Metodología para el desarrollo de la solución

La metodología para el desarrollo de la solución se enmarca dentro del diseño experimental aplicado y el enfoque de la investigación tecnológica con pensamiento sistémico uniendo las variables cualitativas y cuantitativas en el diseño del tratamiento y la creación del filtro. Esta metodología propone abordar la problemática no de manera aislada, sino como un sistema complejo con múltiples interrelaciones y efectos emergentes. Así como lo plantea Espinoza Montes (2014), el pensamiento sistémico permite comprender la totalidad de un objeto o fenómeno a partir de la interacción de sus componentes y su relación con el entorno.

Esta visión permite diseñar una solución tecnológica que sea viable, desde la identificación del problema hasta la construcción del objeto de estudio, considerando los elementos técnicos, sociales, ambientales y económicos. Por lo cual, la metodología propuesta no es solo una serie de experimentos o ensayos aislados, sino que responde a un proceso estructurado y reflexivo que busca transformar una problemática real en una oportunidad de innovación y sostenibilidad.

Tabla 6. Metodología de desarrollo de la solución.

Metodología de desarrollo
1. Recolección y tratamiento del material filtrante



Recolección y preparación del bagazo	Se realizó la recolección y transporte del bagazo de caña proveniente de procesos de producción de panela dentro del municipio de La Peña. Posteriormente se realizó un tratamiento de limpieza y desinfección del bagazo (hipoclorito y agua) para eliminar la materia orgánica y algunos microorganismos. A su vez, que se deshilo el bagazo y se dejó en tiras de fibra para su posterior tratamiento químico.
Activación química del bagazo	Una vez deshilado el bagazo se sumergió en ácido cítrico al 5% durante 24 horas, para después enjuagar con agua destilada y secar en hornos a 80°C durante una hora. Después de realizar esto se debe encapsular el bagazo en fibra textil.
2. Diseño del prototipo del filtro	
Dimensiones y estructura	Para el diseño del prototipo se seleccionó el filtro de lecho debido a su facilidad de encapsulamiento, a la organización y que es más efectivo para que el agua tenga contacto con el bagazo tratado. El prototipo se construyó en una botella plástica de 3 litros donde las capas tuvieron los siguientes materiales y tamaños: 1. Grava gruesa. 5 cm 2. Arena. 5 cm 3. Capa de bagazo. 10 cm 4. Tela o algodón. 2 cm 5. Grava fina. 5 cm
3. Modelado del sistema en SketchUp	
Para un mejor planteamiento del sistema de tratamiento de agua implementado en la finca de la familia Ortiz, se realizó un diseño tridimensional del sistema en la herramienta SketchUp el cual nos permitió identificar los componentes seleccionados incorporando el filtro como módulo central.	
4. Recolección de la muestra	
Para la recolección de las muestras de agua dura de los pozos se hizo una revisión de la NTC ISO 5667 - 11 2021 con el fin de mantener y preservar la muestra hasta sus análisis de laboratorio. Junto con la recolección se midió el caudal de expulsión de agua de los pozos hacia los tanques de almacenamiento.	
5. Caracterización de la muestra de Agua	
Prueba del filtro	Con el fin de conocer las propiedades de remoción del filtro se realizaron 2 de pruebas las cuales consisten en verter a través del filtro volúmenes de agua controlados (hasta 3 L) y se recolectará el efluente. Dentro de las pruebas se debe medir el tiempo de paso, volumen tratado, y controlar la altura del lecho y el flujo por gravedad.



Evaluación de parámetros	Por último, es necesario analizar las muestras antes y después del filtrado usando: Titulación con EDTA para conocer la dureza total ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) del agua.
--------------------------	--

6. Análisis de datos y resultados

Posteriormente, se debe calcular la eficiencia de remoción de la dureza del agua por parte del filtro, analizando los resultados como complemento cualitativo en función de las variables clave (tiempo de contacto, calidad y tipo del material filtrante, caudal tratado, concentración inicial de dureza) y otros parámetros relevantes observados durante la etapa experimental. Este análisis permitirá identificar las tendencias, comparar el desempeño bajo distintas condiciones y establecer recomendaciones para optimizar el diseño y la operación del filtro.

Fuente: Autores



9. Plan de implementación y Resultados

9.1. Preparación del bagazo

En la preparación lo primero que se realizó fue la recolección de aproximadamente 5 kg de bagazo de caña, para posteriormente transportarlo al laboratorio y hacer el proceso de limpieza y desinfección con 1L de hipoclorito y agua destilada.

Ilustración 1. Preparación del bagazo.



Fuente: Autores

Posteriormente, se pesó y se secó en el horno a 60°C durante 24 horas, al sacarlo del horno se realizó un proceso de desfibrado del bagazo dejándolo como hilos lo más pequeños posibles, esto con el fin de tratarlo y usarlo como el material principal para la remoción de dureza en el agua.

9.2. Activación química

Se realizó un tratamiento químico al bagazo, el cual está basado en sumergir 300 gramos del bagazo en un reactivo durante 24h, el reactivo con el que se trabajo fue el con ácido cítrico en una concentración de 5%, esto con



el fin de que sea capaz de retener iones de calcio y magnesio los cuales le dan esa característica de dureza al agua.

Ilustración 2. Activación química del Bagazo y Lavado.



Fuente: Autores

Luego se realizó un lavado con agua destilada para quitar los restos de ácido y después se secó en el horno por 45 minutos a 80°C. finalmente se encapsulo el filtro en una malla, para posteriormente probar la eficiencia del filtro en la remoción de dureza.

9.3. Toma de la muestra

Se realizó el muestreo de agua dura de los pozos de acuerdo a las directrices estipuladas en la NTC-ISO 5667-11:2021, esto con el fin de preservar la muestra en su proceso de transporte hasta los laboratorios de la Universidad Ean, en los cuales se llevó a cabo el análisis físico-químico de la muestra.



Una muestra fue tomada directamente en uno de los pozos, ubicado en las coordenadas LN 5°7'21" / LO 74°25'45". Y la segunda muestra fue tomada del tanque de almacenamiento que utiliza la familia para el consumo doméstico, ubicado en las coordenadas LN 5°7'27" / LO 74°25'36".

Ilustración 3. Toma de la muestra.



Fuente: Autores

A su vez, al tomar la muestra se realizó también la medición del caudal de expulsión de agua de los pozos hacia un tanque de almacenamiento. Este se tomó con ayuda de un temporizador y una jarra de un litro.

Los resultados del caudal fueron los siguientes:

1 litro en 21 segundos para lo cual se realizó un cálculo:

$$Q = \frac{0,001 \text{ m}^3}{21 \text{ seg}} = 0.0000476 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pero por facilidad se manejó el caudal en litros por minuto y litros por hora de la siguiente manera.



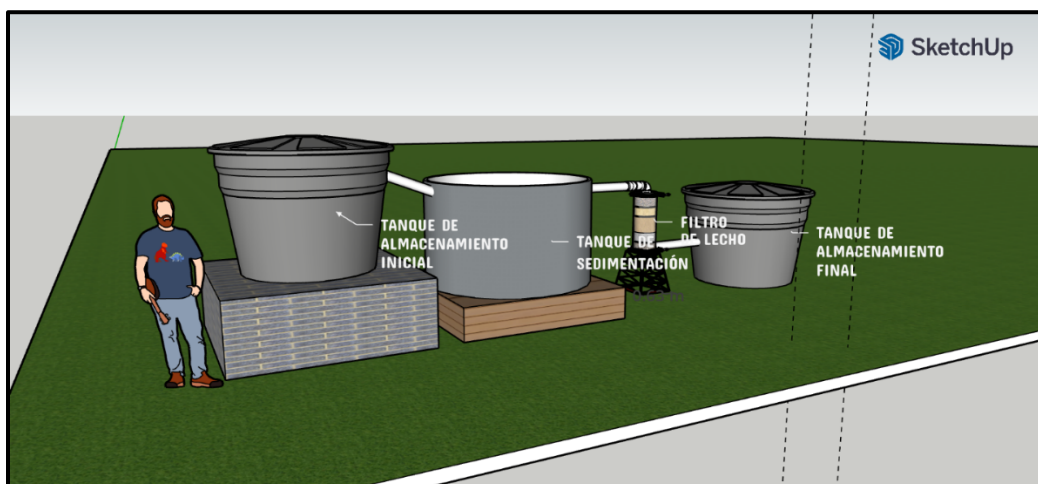
- $Q(L/s) = 0.0000476 \frac{m^3}{s} \times \frac{1000L}{1m^3} = 0.0476 L/s$
- $Q(L/m) = 0.0476 \frac{L}{s} \times \frac{60s}{1m} = 2.856 L/min$
- $Q(L/h) = 2.85 \frac{L}{m} \times \frac{60 min}{1h} = 171.36 L/min$

Con estas propiedades se lograron estimar las dimensiones del sistema de tratamiento y del filtro, así como cada capa dentro de él.

9.4. Diseño del sistema de tratamiento

El sistema fue diseñado para tratar agua subterránea con características de dureza, proveniente de un pozo ubicado en la vereda El Cabuyal, municipio de La Peña (Cundinamarca). El sistema se adapta a un caudal promedio de 2.86 L/min, equivalente a 171.4 L/h, y está destinado para uso doméstico no potable.

Ilustración 4. Sistema de tratamiento 3D.



Fuente: Autores con ayuda de la herramienta SketchUp

Debido a que el pozo tiene un caudal variable (puede disminuir y recuperarse con el tiempo), el sistema fue concebido como modular, de flujo



lento, por gravedad, garantizando eficiencia incluso en condiciones de intermitencia. Reconociendo que el filtro no tiene un flujo constante y teniendo en cuenta que el tiempo recomendado de retención por etapa es de entre 1 a 3 minutos según los resultados obtenidos en el laboratorio el filtro es capaz de tratar entre 30 y 50 litros por hora sin presión. Al optimizar el flujo con ayuda del primer tanque puede alcanzar a tratar 170 L/Hora.

Etapas del Sistema de Tratamiento:

1. Tanque de almacenamiento de agua dura

- Capacidad: 1000 Litros
- Ubicación: Anterior al tanque de sedimentación, con descarga por gravedad.
- Función: almacenar el agua sin tratar para optimizar el flujo a uno continuo para su posterior tratamiento.

2. Tanque de sedimentación (decantador primario)

- Función: retener partículas gruesas como arena, hojas y residuos que puedan afectar el filtro.
- Material sugerido: plástico o acero inoxidable.
- Capacidad: 50 litros.
- Tiempo de retención hidráulica: 15–20 minutos.

3. Filtro vertical de flujo descendente (filtración lenta)

- Altura total del filtro: 95 cm (sumatoria de capas).
- Diámetro interno sugerido: 20 cm → área $\approx 0.0314 \text{ m}^2$.
- Material del cuerpo: tubo de PVC sanitario, tambor plástico reutilizado o contenedor tipo tanque.



- Velocidad de diseño: $0.2-0.3 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ → suficiente para el caudal actual sin forzar el medio filtrante.

Cada capa del filtro esta especificada en la tabla número 10.

3. Tanque de almacenamiento de agua tratada

- Capacidad: 1000 Litros
- Ubicación: posterior al filtro, con descarga por gravedad o válvula.
- Función: almacenar el agua tratada para su uso doméstico durante el día.

9.5. Creación del prototipo de filtro

La base del sistema de tratamiento de agua dura es el filtro de lecho el cual tiene 5 niveles o capas filtrantes específicamente, dispuestos verticalmente dentro de una botella PET de 3 litros, esto en su nivel experimental y de prototipo. La estructura esta especificada de manera más sencilla en la siguiente tabla.

Tabla 7. Estructura del filtro (Prototipo).

Nivel	Material o capa filtrante	Altura aproximada	Función principal
1	Grava gruesa	5 cm	Retener partículas grandes y distribuir el flujo de agua
2	Arena	5 cm	Remover turbidez y partículas finas
3	Bagazo de caña tratado (encapsulado en tela)	10 cm	Capa activa: adsorbe iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), causantes de la dureza
4	Algodón o tela fina	2 cm	Actúa como soporte de retención fina y evita paso



			de fibras o arena
5	Grava fina o soporte	5 cm	Sostiene el sistema y favorece salida del agua sin obstrucciones

Fuente: Autores

La siguiente es la evidencia fotográfica del filtro realizado como prototipo para las pruebas de remoción de dureza del agua:

Ilustración 5. Filtro (Prototipo).



Fuente: Autores

Sin embargo, para la aplicación del filtro de manera real y no a escala, debería tener una altura aproximada de 1,20 metros con un diámetro total de 20 cm y un área de filtración específica de 0,0314m². Las capas del filtro y su altura están definidas en la siguiente tabla:

Tabla 8. Estructura del filtro (Aplicado a la realidad).

Nivel	Material o capa filtrante	Altura aproximada	Función principal
1	Grava gruesa	15 cm	Retener partículas grandes y distribuir el flujo de agua
2	Arena	15 cm	Remover turbidez y



			partículas finas
3	Bagazo de caña tratado (encapsulado en tela)	20 cm	Capa activa: adsorbe iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), causantes de la dureza
4	Algodón o tela fina	20 cm	Actúa como soporte de retención fina y evita paso de fibras o arena
5	Grava fina o soporte	25 cm	Sostiene el sistema y favorece salida del agua sin obstrucciones

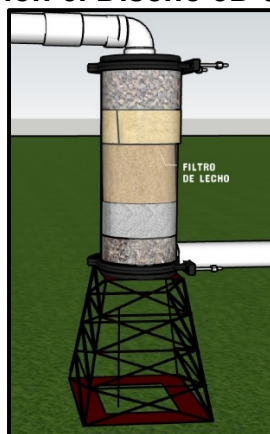
Fuente: Autores

Además, se reconocieron una serie de especificaciones técnicas y unas recomendaciones adicionales para la implementación del prototipo, pero de manera aplicada.

- El tiempo estimado de retención en el filtro debe ser de 10 a 15 minutos (flujo lento).
- El sistema trabaja por gravedad, sin bombeo.
- Se recomienda monitoreo periódico de turbidez y dureza del agua tratada.
- Se recomienda que el filtro este encapsulado en PVC o un cilindro plástico resistente y que tenga un soporte como una rejilla o malla perforada en la base.
- El bagazo puede requerir reposición cada 1 a 3 meses, según carga de dureza.



Ilustración 6. Diseño 3D del filtro.




Fuente: Autores

9.6. Caracterización del agua

9.6.1. Agua de entrada (Agua dura)

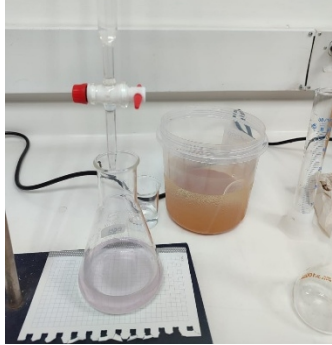
Para conocer el agua dura total de la muestra de entrada fue necesario hacer una titulación con el reactivo EDTA el cual indico los siguientes resultados:

Tabla 9. Tabla de resultados Agua Dura.

Volumen mL de muestra	Volumen de EDTA	Evidencia fotográfica
Muestra 1 (Clara)	34 mL	<p>Ilustración 7. Muestra 1 sin tratar.</p> 

Fuente: Autores



<p>Muestra 2 (Turbia)</p>	<p>48 mL</p>	<p>Ilustración 8. Muestra 2 sin tratar.</p>  <p>Fuente: Autores</p>
--------------------------------------	--------------	---

Fuente: Autores

- Para conocer la concentración total de Dureza en el agua es necesario utilizar la siguiente formula (Huamán C., 2020):

$$Dureza \left(\frac{mg}{L CaCO_3} \right) = \frac{Volumen EDTA \times N EDTA \times 50000}{Volumen de la muestra en mL} \text{ (fórmula 1)}$$

Donde:

EDTA: 0.01 N

Equivalente de CaCO₃: 50 g/mol (peso equivalente = peso molecular / 2)

Volumen de muestra: 50 mL

1000: Factor de conversión a mg

Muestra 1. Dureza total

- La dureza total de la muestra numero 1 está representada en la siguiente formula:

$$Dureza \left(\frac{mg}{L CaCO_3} \right) = \frac{34 mL \times 0,01N \times 50000}{50 mL} = 340 \frac{mg}{L} CaCO_3$$

Muestra 2. Dureza total

- La dureza total de la muestra numero 2 está representada en la siguiente formula:



- $$Dureza \left(\frac{mg}{L CaCO_3} \right) = \frac{48 mL \times 0,01N \times 50000}{50 mL} = 480 \frac{mg}{L} CaCO_3$$

Análisis de Resultados del Agua Filtrada según la Resolución 2115 de 2007

Una vez realizado el proceso de filtración con el prototipo a base de bagazo de caña, se evaluó la dureza total en las muestras de agua tratada. Los resultados obtenidos se compararon con los límites establecidos en la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Salud y Protección Social, la cual define los criterios de calidad del agua para consumo humano en Colombia. Para el parámetro de dureza total, expresada como carbonato de calcio ($CaCO_3$), la resolución indica un valor máximo permisible de 300 mg/L.

Los análisis del agua filtrada arrojaron los siguientes valores de dureza total:

- Para la Muestra 1, se obtuvo una concentración de 255 mg/L $CaCO_3$.
- Para la Muestra 2, se registró una concentración de 170 mg/L $CaCO_3$.

Al contrastar estos resultados con la normativa vigente, se observa que ambas muestras de agua filtrada cumplen satisfactoriamente con el criterio establecido para la dureza total. El valor de 255 mg/L $CaCO_3$ de la Muestra 1 se encuentra significativamente por debajo del límite de 500 mg/L. De igual manera, la Muestra 2, con 170 mg/L $CaCO_3$, también se sitúa holgadamente dentro del rango aceptable.

Estos hallazgos indican que el sistema de tratamiento a escala piloto, empleando un filtro con bagazo de caña activado, fue capaz de reducir la dureza inicial del agua de pozo (Muestra 1: 340 mg/L; Muestra 2: 480 mg/L) a niveles que se ajustan a los

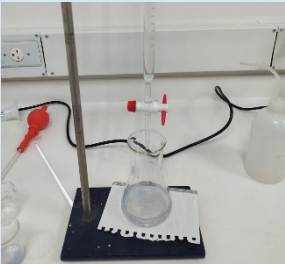
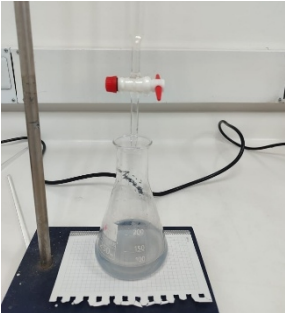


estándares de calidad para consumo humano estipulados por la Resolución 2115 de 2007 en lo referente a este parámetro. La efectividad del filtro en la disminución de la dureza respalda su potencial como una alternativa viable para el tratamiento de aguas en el contexto rural estudiado.

9.6.2. Agua de salida (Agua filtrada)

Para conocer el agua dura total de la muestra de entrada fue necesario hacer una titulación con el reactivo EDTA el cual indico los siguientes resultados:

Tabla 10. Tabla de resultados Agua Filtrada.

Volumen mL de muestra	Volumen de EDTA	Color inicial- Color final
Muestra 1 (Clara)	25,5	Ilustración 9. Muestra 1 filtrada  Fuente: Autores
Muestra 2 (Turbia)	17	Ilustración 10. Muestra 2 filtrada  Fuente: Autores

Fuente: Autores



Para conocer la concentración total de Dureza en el agua después de haberla pasado por el filtro es necesario se utilizó nuevamente la fórmula 1.

Dando los siguientes resultados para cada muestra.

Muestra 1. Dureza total

- La dureza total de la muestra numero 1 está representada en la siguiente formula:

$$Dureza \left(\frac{mg}{L CaCO_3} \right) = \frac{25,5 mL \times 0,01N \times 50000}{50 mL} = 255 \frac{mg}{L} CaCO_3$$

Muestra 2. Dureza total

- La dureza total de la muestra numero 2 está representada en la siguiente formula:

$$Dureza \left(\frac{mg}{L CaCO_3} \right) = \frac{17 mL \times 0,01N \times 50000}{50 mL} = 170 \frac{mg}{L} CaCO_3$$

9.7. Eficiencia en la remoción de dureza

Para calcular la eficiencia de remoción del filtro en las dos muestras se aplicó la siguiente formula:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{Dureza \text{ inicial} - Dureza \text{ final}}{Dureza \text{ inicial}} \times 100$$

Dando como resultado las siguientes eficiencias de remoción

- **Muestra 1. El porcentaje de remoción para la muestra 1 fue de:**

$$\% \text{ de remoción} = \frac{340 - 255}{340} \times 100 = 25 \%$$



- **Muestra 2. El porcentaje de remoción para la muestra 2 fue de:**

$$\% \text{ de remoción} = \frac{480 - 170}{480} \times 100 = 64,58 \%$$

10. Análisis de costos

Se realizó un análisis de costos para el prototipo y luego una proyección del modelo, pero de manera aplicada, empezando por definir las variables de costo.

Los costos directos son aquellos que corresponden de manera directa con la fabricación o creación del producto, como materias primas o mano de obra directa.

Los costos indirectos, por su parte, incluyen gastos relacionados con el entorno operativo, aspectos legales, pagos de nómina administrativa después de la aplicación del proyecto, imprevistos y otros rubros que no están directamente relacionados a la producción.

Finalmente, el capital de trabajo el cual se refiere a la inversión económica inicial necesaria para poner en marcha el proyecto, incluyendo la adquisición de materias primas, el pago de nómina durante los primeros ciclos operativos y otros gastos hasta alcanzar resultados comerciales o retornos de inversión.

Información con la cual se definió el análisis de costos para el prototipo.

Tabla 11. Análisis de costos (Prototipo).

Creación del filtro



Costos fijos		
Material	Costo total	Observación
Grava gruesa	6.000 COP	Se utilizo para la primera capa del filtro. No se usó todo el material comprado.
Grava fina	7.000 COP	Se utilizo para la capa base del filtro.
Arena de sílice	25.000 COP	Se utilizo como la segunda capa del filtro, de arriba abajo. No se usó todo el material comprado.
Algodón	8.000 COP	Se utilizo como la 4 capa del filtro. No se usó todo el material comprado.
Bolsa de tela (encapsulado)	8.000 COP	
Botella PET 3 L	8.500	Fue necesario comprar una botella con contenido ya que no se logró encontrar una vacía.
Bagazo de caña seco	Donado	El bagazo al ser un residuo de producción no tiene un costo.
Costos indirectos		
Transporte bagazo (La Peña – Bogotá)	120.000 COP	El transporte del bagazo fue desde La Peña hasta Bogotá.
Tratado químico del bagazo	0 COP	La universidad Ean nos brindó los espacios necesarios para realizar el tratamiento.
Reactivos y laboratorio	0 COP	Así como también los materiales y equipos para la ejecución del proyecto.
Muestra para caracterización del agua		
Nevera de almacenamiento	30.000 COP	Almacenamiento y transporte de la muestra.
Recipientes para muestra	12.000 COP	Almacenamiento de la muestra.
Hielo	6.000 COP	Enfriamiento de la muestra.



Trabajo de campo	580.000 COP	El transporte de la muestra se hizo desde la finca de la familia Ortiz hasta Bogotá en un carro alquilado, por ende, el precio más elevado.
Capital de trabajo o inversión		
810.500 COP		

Fuente: Autores

Después se realizó el análisis para el proyecto aplicado en el municipio de La Peña.

Tabla 12. Análisis de costos (Proyecto aplicado).

Creación del filtro		
Costos fijos		
Material	Costo total	Observación
Tubo PVC 8" (120 cm)	10.000 COP	Capsula resistente de todo el filtro.
Arena (15 kg)	25.000 COP	Creación del filtro.
Grava gruesa y fina (30 kg)	25.000 COP	Creación del filtro.
Algodón	16.000 COP	Creación del filtro.
Bolsa de tela industrial	35.000 COP	Creación del filtro.
Costos indirectos		
Transporte bagazo	580.000 COP	Es necesario transportar el bagazo a los laboratorios.
Tratado químico del bagazo	2'400.000 COP	Para tratar químicamente el bagazo se tomaron en cuenta también los costos de los reactivos y el laboratorio.
Sistema de tratamiento		
Costos Fijos		
Tanque de almacenamiento 1	506.900 COP	Tanques para el sistema revisados en COLEMPAQUES.
Tanque de sedimentación	4'000.000 COP	Tanques para el sistema revisados en COLEMPAQUES.
Tanque de almacenamiento 2	506.900 COP	Tanques para el sistema revisados en COLEMPAQUES.



Válvulas, codos y conexiones	80.0000 COP	
Soporte estructural	130.000	Es un soporte para el filtro mandado hacer en algún material resistente.
Manguera y tubería adicional	80.000	
Costos variables		
Transporte de materiales	300.000 COP	
Mantenimiento	240.000 COP	El costo diario por dos operarios que hagan el mantenimiento y el cambio de la capa de bagazo del filtro.
Capacitación comunitaria o manual de uso	120.000 COP	Es necesario capacitar a la comunidad sobre el uso y las ventajas de tener el sistema de tratamiento.
Capital de trabajo o inversión		
9'100.000 COP		

Fuente: Autores

10.1 Análisis de costos del prototipo académico

El diseño del prototipo fue concebido con fines de experimentación en laboratorio, por lo que su escala y materiales fueron elegidos para facilitar el montaje, evaluación y pruebas de remoción de dureza del agua. Los costos involucrados en esta etapa se clasifican en costos fijos (materiales), costos indirectos (transporte, almacenamiento y pruebas) y capital de trabajo. El capital de trabajo total invertido fue de 810.500 COP.

Entre los costos fijos se encuentran materiales como grava gruesa y fina, arena de sílice, algodón, tela para encapsulado y una botella PET de 3 litros, sumando un total de 62.500 COP. El bagazo de caña, material central del filtro, fue donado por



un productor, lo que eliminó el gasto por materia prima principal. Por su parte, los costos indirectos sumaron 718.000 COP, siendo el mayor rubro el transporte del bagazo desde La Peña hasta Bogotá (120.000 COP) y el trabajo de campo asociado a la toma y traslado de las muestras (580.000 COP).

Cabe resaltar que tanto el tratamiento químico como los análisis de laboratorio fueron realizados en la Universidad EAN, lo cual permitió reducir significativamente los costos del proyecto, ya que el uso de reactivos y equipos especializados no generó inversión adicional. Este contexto resalta cómo la infraestructura académica facilita la validación de soluciones innovadoras y de bajo costo.

10.2 Análisis de costos del sistema aplicado en la finca

Para la implementación real del sistema en la finca, se realizó una proyección detallada de los costos necesarios para construir el filtro y todo el sistema complementario que permita operar sin requerimientos eléctricos, aprovechando la gravedad para el flujo del agua. En esta proyección, el capital de trabajo estimado es de 9.100.000 COP, incluyendo infraestructura básica, tratamiento del bagazo y gastos asociados a operación inicial y capacitación.

Los costos fijos del filtro incluyen un tubo de PVC de 8" por 120 cm (10.000 COP), 15 kg de arena (25.000 COP), 30 kg de grava (25.000 COP), algodón (16.000 COP) y bolsa de tela industrial (35.000 COP). A esto se suman elementos estructurales del sistema como tres tanques (almacenamiento y sedimentación) que



tienen un costo total de 5.013.800 COP, válvulas y conexiones (80.000 COP), soporte (130.000 COP) y mangueras adicionales (80.000 COP).

Entre los costos indirectos, el más significativo es el tratamiento químico del bagazo (2.400.000 COP), seguido por el transporte (580.000 COP) y el desarrollo de materiales de capacitación para la comunidad (120.000 COP). También se considera el mantenimiento del sistema, que implica un costo operativo estimado de 240.000 COP para dos personas durante el periodo inicial de ajuste.

Este análisis demuestra que el sistema, aunque requiere una inversión inicial considerable, es mucho más económico y sostenible a largo plazo en comparación con otras tecnologías comerciales como la ósmosis inversa o los ablandadores de resinas. Además, al usar residuos agroindustriales y estructuras reutilizables, se contribuye a la economía circular y se facilita la adopción comunitaria en zonas rurales, donde los recursos económicos suelen ser limitados.



11. Conclusión

El presente proyecto logró cumplir con el objetivo general propuesto: diseñar un sistema de tratamiento de agua a escala piloto utilizando un filtro elaborado a partir de bagazo de caña, con el fin de reducir la dureza total del agua de pozo en la zona rural de La Peña, Cundinamarca. A partir del desarrollo de esta investigación se demostró que el uso de residuos agroindustriales, como el bagazo proveniente de la producción de panela, representa una alternativa eficiente, económica y ambientalmente sostenible para abordar problemáticas asociadas a la calidad del agua en contextos rurales.

En primer lugar, se caracterizó fisicoquímicamente el agua de pozo proveniente de la finca de estudio, encontrando concentraciones de dureza por encima de los valores recomendados por la normativa colombiana. Esta caracterización permitió definir con precisión los requerimientos del sistema de tratamiento, priorizando la remoción de iones de calcio y magnesio como parámetros críticos para mejorar la calidad del agua destinada a actividades domésticas y agrícolas.

En segundo lugar, se elaboró un filtro funcional a partir de bagazo activado con ácido cítrico, el cual fue encapsulado y dispuesto en un lecho filtrante junto con arena, grava y algodón. El sistema fue sometido a pruebas de laboratorio que evidenciaron una reducción significativa de la dureza, con eficiencias de remoción que permitieron alcanzar valores por debajo del límite máximo permitido por la Resolución 2115 de 2007 para agua potable. Esto valida técnicamente la



efectividad del diseño planteado y su capacidad para funcionar en condiciones reales.

En tercer lugar, se diseñó un sistema completo de tratamiento adaptable a la realidad de las fincas rurales, considerando criterios de operación sin energía eléctrica (flujo por gravedad), bajo mantenimiento y facilidad de replicación. El análisis de costos demostró que el sistema propuesto es accesible para familias campesinas, ya que su construcción puede realizarse con materiales de bajo costo y alta disponibilidad local, minimizando así las restricciones económicas que dificultan el acceso a tecnologías de tratamiento convencionales.

Asimismo, se evaluó la viabilidad de implementar esta solución de manera sostenible, integrando criterios ambientales (como el aprovechamiento de residuos y la disposición adecuada del bagazo usado), sociales (participación comunitaria y facilidad de uso), y normativos (cumplimiento de estándares de calidad del agua). El proyecto también identificó restricciones clave en aspectos legales, de salud y de seguridad, y propuso medidas para garantizar una implementación segura y responsable.

Finalmente, este trabajo no solo responde a una necesidad local específica, sino que también contribuye al desarrollo de tecnologías apropiadas para el tratamiento de agua en comunidades con acceso limitado a infraestructura. El sistema diseñado puede ser replicado y adaptado en otras regiones del país con condiciones



similares, lo cual lo convierte en una solución innovadora con potencial de impacto social, ambiental y tecnológico a nivel territorial.



12. Referencias

- Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA). (2022). *Citric Acid - Substance Information*. <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.000.797>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2011, diciembre). *Lineamientos para exploración y perforación, realización de pruebas de bombeo y mantenimiento y limpieza de captaciones de aguas subterráneas*. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/recurso-hidrico/publicaciones/lineamientos-aguas-subterraneas.pdf>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2007, abril). *2. Acuíferos y su funcionamiento*. Hispagua. https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/aguas%20subterraneas/2_acuiferos.htm
- Congreso de Colombia. (2021). *Ley 2169 de 2021*. Recuperado de https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/ley_2169_2021.htm
- Corporación Autónoma Regional del Cesar. (2014, diciembre 16). *Resumen ejecutivo: Formulación del Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica de la Quebrada Buturama - Quebrada Guaduas y Desarrollo de un proceso de Organización, Promoción, Capacitación y Difusión a nivel institucional y de las comunidades para la gestión integral en la Cuenca



Hidrográfica*. <https://www.corpocesar.gov.co/files/RESUMEN%20EJECUTIVO-Buturama.pdf>

- El País. (2024, octubre 24). *Las nuevas funciones ambientales de las autoridades indígenas encienden un debate en Colombia*. Recuperado de <https://elpais.com/america-colombia/2024-10-24/las-nuevas-funciones-ambientales-de-las-autoridades-indigenas-encienden-un-debate-en-colombia.html>
- Espinoza, C. (2014). *Metodología de investigación tecnológica: Pensando en sistemas*. Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1148/mit2.pdf>
- Galindo, A., Toncel, E., & Rincón, N. (2016). Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *Revista ION*, 29(2), 37–48. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016003>
- García, L., & Torres, R. (2021). Sostenibilidad y economía circular en el tratamiento del agua. *Environmental Technology*.
- García, L., & Torres, R. (2021). *Sostenibilidad y economía circular en el tratamiento del agua*. *Environmental Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12345-021-00012-3>
- Gómez-Patiño, M. B., Cruz-Barroso, M. A., Perea-Flores, M. J., & Arrieta-Baez, D. (2018). Obtención de biopolímeros a partir de residuos de jitomate mediante



cloruro de colina: $2ZnCl_2$ y DCC/DMAP. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 9(1), 35-41.

- Gómez-Patiño, M. B., Cruz-Barroso, M. A., Perea-Flores, M. J., & Arrieta-Baez, D. (2018). *Obtención de biopolímeros a partir de residuos de jitomate mediante cloruro de colina: $2ZnCl_2$ y DCC/DMAP*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 9(1), 35–41.
- Gómez-Patiño, M. B., Cruz-Barroso, M. A., Perea-Flores, M. J., & Arrieta-Baez, D. (2018). *Obtención de biopolímeros a partir de residuos de jitomate mediante cloruro de colina: $2ZnCl_2$ y DCC/DMAP*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 9(1), 35–41.
- Gutiérrez, M., & Espinoza, M. (2020). *Sistemas de filtración: Una revisión técnica de los procesos físicos, químicos y biológicos para la purificación del agua*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Huamán C. (2020). *Evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes mediante filtros de residuos orgánicos en aguas residuales de granjas porcinas* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7844/TESIS%20CARLOS%20E.H.C.pdf?sequence=1>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2021). *Calidad del agua subterránea en Colombia*. Bogotá, Colombia.



- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024, Octubre).
Nivel piezométrico. <https://ideam.gov.co/atencion-y-servicios-a-la-ciudadania/glosario/nivel-piezometrico>
- International Organization for Standardization (ISO). (2015). Water quality - Sampling - Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques (ISO 5667-1:2015).
- Jiménez, J. et al. (2019). Uso de biomateriales para la adsorción de metales pesados en agua potable. *Environmental Science & Technology*.
- Jiménez, J. et al. (2019). Uso de biomateriales para la adsorción de metales pesados en agua potable. *Environmental Science & Technology*.
- Jiménez, J., Ramírez, A., & Palacios, M. (2019). *Uso de biomateriales para la adsorción de metales pesados en agua potable*. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/es9023456>
- Khadir, A., Negarestani, M., Kheradmand, A., Azad, A., & Sillanpää, M. (2021). The Utilization of Biomaterials for Water Purification: Dyes, Heavy Metals, and Pharmaceuticals. *Novel Materials for Dye-Containing Wastewater Treatment*, 27-48. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2892-4_2
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2015). *Resolución 0631 de 2015*. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/Resolucion-0631-de-2015.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2018). Evaluación de los recursos hídricos en Colombia. Bogotá, Colombia.



- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2021). *Resolución 1256 de 2021*. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1256-de-2021/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2021). *Resolución 1256 de 2021*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1256-de-2021/>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). Decreto 1575 de 2007. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). Resolución 2115 de 2007. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). Resolución 2115 de 2007. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2020). Guía RAS-007: Perforación manual de pozos profundos de pequeño diámetro. Recuperado de <https://www.minvivienda.gov.co/guias/guia-ras-007>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017*. Recuperado de <https://www.minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- Mohamed, M. H., Udoetok, I. A., Solgi, M., Steiger, B. G., Zhou, Z., & Wilson, L. D. (2022). Design of sustainable biomaterial composite adsorbents for point-of-use removal of lead ions from water. *Frontiers in Water*, 4, 739492.
- Nguyen, Y., Tsang, Y. F., & Ok, Y. S. (2018). Innovative adsorbents for water purification: Recent advances and challenges. *Journal of Environmental*



Management.

- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *Cartilla técnica: Aguas subterráneas acuíferos*. Global Water Partnership, GWP Centroamérica, y CAP-Net.
https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guías para la calidad del agua potable (4ta ed.). Ginebra, Suiza.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). *Guías para la calidad del agua potable*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Palansooriya, K. N., Yang, Y., & Tsang, Y. F. (2020). Occurrence of contaminants in drinking water sources and the potential of biochar for water quality improvement: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(6), 549–611.
- Palansooriya, K. N., Yang, Y., Tsang, Y. F., Sarkar, B., Hou, D., Cao, X., Meers, E., Rinklebe, J., Kim, K.-H., & Ok, Y. S. (2020). Occurrence of contaminants in drinking water sources and the potential of biochar for water quality improvement: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(6), 549–611. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629803>
- Radionov, M., Iurchenko, V., Melnikova, O., Mykhailova, L., & Rachkovskiy, O. (2020). Influence on Environmental Safety of the Drinking Water of Nitrification in Water Reservoir Being a Source of Water Supply and Filter Filling Materials in Water Treatment Facilities. *Materials Science Forum*, 1006, 187–193.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.187>



- Ramos Pérez, G. L., Gentil Calderón, J. S., & González Forero, R. (2020). Plantas piloto de tratamiento de agua potable y agua residual (Primera edición.). Universidad de la Salle.
- Reyes Tineo, W. (2019). Influencia del consumo de agua dura de pozo sobre la salud de los pobladores del caserío Nuevo Huancabamba, Moyobamba, 2017. <https://core.ac.uk/download/pdf/287333867.pdf> Kabir, Sekine, M., y Ghosh, G. C. (2020). Towards safely managed drinking water supply in the hard-to-reach areas in Bangladesh: modified biosand filters and safe storage. *Desalination and Water Treatment*, 173, 177–185.
- San Elías Landin, K., y Nicasio Tovar, D. A. (2017). elaboración de un filtro de agua a partir de residuos domésticos. *jóvenes en la ciencia*, 3(2), 802–806. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2082>
- Sánchez Torres, L. D., & Quiroga Rubiano, É. (2020). sostenibilidad de las tecnologías de tratamiento de agua para la zona rural. *Revista de ingeniería*, 49, 52-61. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.7>
- Sanhueza, C., Palma, J., Valenzuela, P., Araneda, O., & Calderón, K. (2011). Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas. *Revista De La Construcción*, 10(2), 66–81. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2011000200007>



- Shafahi, M., & Vafai, K. (2011). Interfacial interactions of biomaterials in water decontamination applications. *Journal of Materials Science*, 46(18), 6277-6284. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5417-8>
- Shaghaleh, H., Xu, X., & Wang, S. (2018). Current progress in production of biopolymeric materials based on cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose derivatives. *RSC Advances*, 8, 825-842. <https://doi.org/10.1039/c7ra11157f>
- Sorlini, S., Biasibetti, M., Collivignarelli, M. C., & Crotti, B. M. (2015). Reducing the chlorine dioxide demand in final disinfection of drinking water treatment plants using activated carbon. *Environmental Technology*, 36(12), 1499–1509. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.994043>
- Supply of Avcat Filter Water Separator Fws with All Accessories, Avcat Filter Water Absorber Fws with All Accessories, Loose Fittings Instrumentation as Applicable, Documentation Hard Copy, Documentation Soft Copy, Service Engineer Charges as Per Ta, Pres. (2024). In MENA Report. Disco Digital Media, Inc.
- Supply Of Plastic Filter Nozzles Type- Rts: Plastic Filter Nozzles Type Rts. (2022). In MENA Report. Disco Digital Media, Inc.
- Torres, C. A., García-Ubaque, C. A., Garcia-Ubaque, J. C., García-Vaca, M. C., & Pacheco García, R. (2017). Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración. *Revista de Salud Pública (Bogotá, Colombia)*, 19(4), 453–459. <https://doi.org/10.15446/rsap.v19n4.56039>
- Torres, P., Rodríguez, J., y Uribe, I. . E. . (2023). tratamiento de aguas



residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio:

influencia del medio de soporte. *scientia et technica*, 3(23). recuperado a partir

de <https://moodle2.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7393>

- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2013). *Groundwater Sampling Guidelines for Superfund and RCRA Project Managers*.
- Vilcarin Salcedo, R. J. (2019). *Sistemas de filtración*. Universidad Nacional “San Luis Gonzaga” de Ica, Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica.
- World Health Organization (WHO). (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th Ed.). Geneva, Switzerland.
- Yusuf, K. O., y Murtala, M. O. (2020). Development and performance evaluation of a portable household ceramic water filter with activated carbon and magnetic treatment unit. *International Journal of Environmental Science and Technology* (Tehran), 17(9), 4009–4018. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02747-4>