

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

Evaluación de un sistema de filtración para el tratamiento de agua cruda utilizando cascarilla de café modificada con nanopartículas de plata

Paula Andrea Díaz Bayuelo y Natalia Soler Cediel

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniería Ambiental

Director

Martha Jhoana Estévez Gómez

MSc. Esp. Ing.

Codirector

Angélica Ma. Candela Soto

Ph.D. MSc. Qca.

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad Ingeniería Ambiental

2020

Dedicatoria

A Dios, quien es mi principal motor y fue quién me permitió obtener este primer logro tan importante para mi vida de lograr ser una Ingeniera Ambiental.

A mis padres, Luis y Edith, y mi hermano, Juan David, quiénes han sido mi apoyo incondicional y motivación para estudiar mi carrera profesional, y conocen de todo mi esfuerzo para llegar hasta este día.

A mis familiares y amigos cercanos, quienes han estado presentes en mi crecimiento profesional y personal, y con sus consejos me ayudan a mejorar cada día.

Paula Díaz.

A Dios, por permitirme estudiar una carrera profesional, por acompañarme y respaldarme en cada paso que doy. A mis padres, Bertha Cediél y Javier Soler, por haberme brindado la oportunidad de formarme como profesional, sin su apoyo no podría obtener el título de Ingeniera Ambiental. Finalmente, a mi hermana Manuela Soler, por estar ahí para mí, por lanzarme un cable cuando más necesito enchufarme.

Natalia Soler.

Agradecimientos

A nuestra directora, Martha Estévez por apoyarnos y guiarnos para desarrollar de la mejor forma esta investigación y con su interés siempre estuvo atenta a ayudarnos en nuestras inquietudes para que culmináramos esta etapa de nuestra formación profesional.

A nuestra codirectora, Angélica Candela quien nos asesoró y guió con sus aportes para lograr culminar este proyecto.

A la Universidad Santo Tomás, que nos prestó sus instalaciones y permitió que fuese posible el desarrollo de este proyecto.

Al proyecto de la XII convocatoria interna N° 41 y al proyecto de semilleros VIII convocatoria interna de interna No. 87 de la Universidad Santo Tomás seccional Bucaramanga, Acta 163 del 05 de febrero de 2020, por brindarnos el apoyo financiero necesario para la realización de la investigación.

Agradecemos a todos nuestros profesores de carrera, por enseñarnos los conocimientos necesarios para lograr ser profesionales íntegras y comprometidas con nuestra carrera.

Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo General	19
1.2 Objetivos Específicos	19
2. Marco Referencial	20
2.1 Marco Teórico	20
2.1.1 Agua cruda	20
2.1.2 Agua Potable.....	20
2.1.3 Tratamiento de agua potable.....	21
2.1.3.1 Filtración en múltiples etapas (FiME).....	21
2.1.3.1.1 Filtros gruesos dinámicos (FGDi).....	22
2.1.3.1.2 Filtración gruesa (FG).	22
2.1.3.1.3 Filtración lenta en arena (FLA).....	22
2.1.3.1.4 Criterios de diseño recomendados para los FiME.....	22
2.1.3.2 Ventajas y limitaciones de los FiME.	23
2.1.3.2.1 Ventajas de los FiME.	23
2.1.3.2.2 Limitaciones de los FiME.	24

2.1.4 Cascarilla de café.....	26
2.1.5 Té verde.....	27
2.1.6 Nanopartículas de plata.....	27
2.1.7 Síntesis química de nanopartículas.....	28
2.1.7.1 Reducción química.....	28
2.1.8 Síntesis verde de nanopartículas.....	29
2.2 Estado del Arte	29
2.3 Marco Legal.....	39
3. Método	42
3.1 Diagnóstico Ambiental y Caracterización Fisicoquímica	42
3.2 Diseño y elaboración del sistema de filtración.....	43
3.3 Síntesis de nanopartículas de plata en cascarilla de café.....	46
3.3.1 Síntesis de nanopartículas de plata en cascarilla de café aplicando el método químico	46
3.3.2 Síntesis de nanopartículas de plata en cascarilla de café aplicando la síntesis verde.	46
3.4 Caracterización de las nanopartículas de plata	47
3.5 Análisis de la eficiencia del sistema	47
4. Resultados y Discusión	48
4.1 Diagnóstico Ambiental y Caracterización Fisicoquímica	48
4.1.1 Diagnóstico Ambiental.	48

4.1.2 Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica.	49
4.2 Diseño y elaboración del sistema de filtración.....	51
4.3 Síntesis de nanopartículas de plata en cascarilla de café aplicando el método químico y síntesis verde	54
4.4 Análisis de la eficiencia del sistema.....	57
5. Conclusiones	62
6. Recomendaciones.....	64
Referencias Bibliográficas	66
Apéndices.....	73

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Indicadores de la calidad del agua</i>	21
Tabla 2. <i>Resumen de valores de diseño para los FiME</i>	23
Tabla 3. <i>Ventajas de los FiME</i>	24
Tabla 4. <i>Niveles de contaminación que exceden la capacidad de tratamiento</i>	25
Tabla 5. <i>Condiciones que inhiben o reducen la eficiencia del proceso de tratamiento</i>	25
Tabla 6. <i>Caracterización de la cascarilla de café</i>	27
Tabla 7. <i>Normativa relacionada con el recurso hídrico</i>	40
Tabla 8. <i>Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de estudio</i>	42
Tabla 9. <i>Dimensionamiento de las unidades de filtración a escala 1:5 según el RAS 2017</i>	43
Tabla 10. <i>Condiciones fisicoquímicas y microbiológicas del agua cruda</i>	50
Tabla 11. <i>Comparación de los valores de la muestra inicial con la normativa ambiental</i>	50
Tabla 12. <i>Profundidad del medio filtrante</i>	53
Tabla 13. <i>Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua cruda y filtrada</i>	58
Tabla 14. <i>Eficiencia de remoción en parámetros microbiológicos</i>	60
Tabla 15. <i>Criterios de calidad admisibles para consumo humano y doméstico</i>	73
Tabla 16. <i>Criterios de calidad admisibles para uso agrícola</i>	74
Tabla 17. <i>Criterios de calidad admisibles para uso pecuario</i>	75
Tabla 18. <i>Criterios de calidad admisibles para uso recreativo mediante contacto primario</i>	75
Tabla 19. <i>Valores máximos aceptables de características físicas para consumo humano</i>	76
Tabla 20. <i>Valores máximos aceptables de características químicas para consumo humano</i>	76

Tabla 21. <i>Valores máximos aceptables de características microbiológicas para consumo humano</i>	
.....	77
Tabla 22. <i>Características de filtración convencional</i>	77
Tabla 23. <i>Rangos de tasa de filtración lenta en múltiples etapas (FiME)</i>	77
Tabla 24. <i>Características de las membranas de filtración avanzada</i>	78

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Partes de un grano de café	26
<i>Figura 2.</i> Diseño conceptual del sistema de filtración	44
<i>Figura 3.</i> Diseño del prototipo del sistema de filtración a escala laboratorio	45
<i>Figura 4.</i> Áreas de almacenamientos y canales artificiales de la universidad.....	49
<i>Figura 5.</i> Muestra inicial de agua cruda	51
<i>Figura 6.</i> Sistema de filtración a escala laboratorio	52
<i>Figura 7.</i> Síntesis de AgNPs en cascarilla de café aplicando el método químico.....	55
<i>Figura 8.</i> Síntesis de AgNPs en cascarilla de café aplicando método verde.....	56
<i>Figura 9.</i> Cascarilla de café modificada con nanopartículas de plata	56
<i>Figura 10.</i> Muestras de agua filtrada.....	58
<i>Figura 11.</i> Porcentaje de remoción de parámetros microbiológicos	60
<i>Figura 12.</i> Reporte de resultados microbiológicos muestra filtrada con cascarilla + AgNPs (SV)	79
<i>Figura 13.</i> Reporte de resultados microbiológicos del agua cruda	80
<i>Figura 14.</i> Reporte de resultados microbiológicos muestra filtrada con cascarilla + AgNPs (SQ)	81
<i>Figura 15.</i> Reporte de resultados microbiológicos de la muestra filtrada con cascarilla sin modificación	82
<i>Figura 16.</i> Certificado de participación en primer congreso internacional, estudiante Paula Díaz	83

Figura 17. Certificado de participación en primer congreso internacional, estudiante Natalia Soler

..... 84

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Criterios de calidad para destinación del recurso según el decreto 1594 de 1984 ..	73
Apéndice B. Valores máximos aceptables de características físicas, químicas y microbiológicas para consumo humano según la resolución 2115 de 2007.....	76
Apéndice C. Características de filtración convencional, FiME y filtración avanzada, según la resolución 330 del 2017	77
Apéndice D. Resultado de caracterización de muestras por el Laboratorio SIAMA	79
Apéndice E. Certificado de participación en el primer congreso internacional Objetivos de desarrollo sostenible: Esfuerzos en América Latina y el Caribe	83

Glosario

Agente estabilizante: Polímero o surfactante necesario para evitar la aglomeración superficial de partículas.

Agente reductor: Especie química que cede electrones a un agente oxidante.

Bionanocompositos: Materiales con características de tamaños nanométricos, biodegradables y biocompatibles.

Coliformes fecales: Subgrupo de bacterias coliformes totales que se encuentran en los intestinos y excrementos de humanos y animales.

Coliformes totales: Grupo de especies bacterianas indicadoras de contaminación de agua.

Conexiones hidráulicas: Tubería PVC de ½", válvulas y codos requeridos para la conexión entre las unidades de tratamiento.

Enfermedades de origen hídrico: Enfermedades transmitidas por agua contaminada (cólera, fiebre tifoidea, meningitis, hepatitis, diarrea, entre otras).

Escherichia coli: Bacilo gramnegativo de la familia de las enterobacterias que se encuentran en el tracto gastrointestinal de humanos y animales de sangre caliente.

Microorganismos patógenos: Organismos que no pueden ser observados sino es con la ayuda de un microscopio, y que causan enfermedades en los seres humanos.

Microscopio electrónico de barrido: Microscopio electrónico capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando interacciones electrón-materia.

Nanocompósito: Sistema formado por materiales con tamaños nanométricos soportados sobre diferentes tipos de macromoléculas.

Nanopartículas: Pequeñas partículas con al menos una dimensión entre 1-100 nanómetros.

Tasa de filtración: Cociente entre el caudal y el área filtrante.

Tiempo de contacto: Tiempo transcurrido que requiere el agua para atravesar el medio filtrante.

Tren de tratamiento: Sistema de filtración que comprende todas las unidades de tratamiento.

Resumen

El proyecto tuvo como propósito analizar la eficiencia en la remoción de parámetros de interés sanitario del agua cruda captada del Río Hato hasta la Finca El Limonal, mediante la implementación de un prototipo de Filtración en Múltiples Etapas (FiME) y un filtro final utilizando cascarilla de café modificada con nanopartículas de plata como material filtrante. Las nanopartículas se sinterizaron mediante dos métodos: reducción química (borohidruro de sodio) y síntesis verde (té verde), obteniendo porcentajes de remoción en coliformes totales y fecales mayores al 99% con la reducción química y de 20,37% y 99,05% respectivamente mediante síntesis verde. En términos microbiológicos, el agua tratada por el sistema de filtración se puede destinar a uso agrícola y recreativo cumpliendo con la normativa vigente.

Palabras Clave: Tratamiento de agua, filtración en múltiples etapas, nanopartículas de plata, reducción química, síntesis verde, cascarilla de café.

Abstract

The purpose of the project was to analyze the efficiency in the removal of sanitary interest parameters of the raw water collected from the Hato River to the El Limonal Farm, through the implementation of a Multi-Stage Filtration prototype (FiME) and a final filter as a disinfection stage, using modified coffee husk with silver nanoparticles as filter material. The nanoparticles were sintered by two methods: chemical reduction (sodium borohydride) and green synthesis (green tea), obtaining removal efficiency percentages of total and fecal coliforms greater than 99% with chemical reduction and 20.37% and 99.05% respectively through green synthesis. In microbiological terms, the water treated by the filtration system can be used for agricultural and recreational uses, complying with current regulations.

Key Word: Water treatment, multi-stage filtration, silver nanoparticles, chemical reduction, green synthesis, coffee husk.

Introducción

El agua potable es un recurso fundamental para el ser humano, siendo vital para el desarrollo de sus actividades diarias. Desde la antigüedad ha sido utilizada para diferentes actividades como la agricultura, ganadería, minería, entre otros. El aumento poblacional ha generado un incremento en la demanda de dicho recurso, sin embargo, no todas las personas cuentan con acceso a éste. Según la Organización Mundial de la Salud aproximadamente 1,1 mil millones de personas en todo el mundo no cuentan con acceso a fuentes de agua de calidad, por otra parte, 2,4 mil millones de personas no tienen acceso a instalaciones de saneamiento (OMS, 2013). Por esta razón, según la ONU, aproximadamente 780.000 personas en condición de vulnerabilidad mueren al año por falta de acceso al agua potable o por problemas de saneamiento, debido a que ingieren el agua directamente de la fuente, ingiriendo a su vez microorganismos patógenos, los cuales son los causantes principales de enfermedades gastrointestinales (Semana Sostenible, 2019). Es por esto, que el Programa de las Naciones Unidas en Desarrollo, dentro de los objetivos de desarrollo sostenible se enfoca en agua limpia y saneamiento, donde plantea que para el 2030 se debe lograr el acceso universal de agua limpia y servicios de saneamiento e higiene, principalmente en aquellas zonas con condiciones de vulnerabilidad, como lo son las áreas rurales (PNUD, 2018).

La Universidad Santo Tomás cuenta con un campus Sede El Limonal, ubicado en el municipio de Piedecuesta, en el que se llevan a cabo principalmente tres tipos de actividades: producción avícola, producción ovina caprina y producción agrícola. Por otra parte, el campus cuenta con una fuente hídrica que lo atraviesa totalmente y procede de una captación del Río Hato, utilizando dicho recurso para abastecer necesidades de tipo doméstico, riego de cultivos y consumo de animales como gallinas, cabras, conejos, y vacas. Sin embargo, la fuente hídrica no cumple con

los criterios de calidad establecidos en el Decreto 1594 de 1984 para uso doméstico, agrícola y pecuario, ya que, aguas arriba de la captación de la finca se realizan algunas actividades de agricultura, porcicultura e industriales, las cuales han generado deterioro en el cuerpo hídrico aumentando la carga de microorganismos patógenos que deterioran su calidad. Debido a lo anterior, surgió la necesidad de buscar una alternativa económicamente viable, ambientalmente sostenible y eficiente para tratar el agua y minimizar los riesgos asociados a su uso directo.

Los sistemas de filtración en múltiples etapas (FiME) son sistemas reconocidos gracias a su tecnología sencilla, confiable y eficiente, ya que logran producir agua con baja turbiedad, libre de impurezas suspendidas y libre de entero-bacterias, entero-virus y quistes de protozoarios. Sin embargo, a pesar de sus altas tasas de remoción en contaminantes, no tienen una efectividad del 100%, por lo que, se recomienda añadir una unidad de desinfección al final del sistema para efectos de mayor remoción en cuanto a organismos patógenos. Existen diversos tratamientos de desinfección, sin embargo, en los últimos años las nanopartículas de plata se han destacado por su capacidad antibacteriana. Por lo anterior, en la presente investigación, se analizó la viabilidad del uso de cascarilla de café modificada con nanopartículas de plata en un sistema de filtración como alternativa para tratar el agua cruda en El Limonal proveniente del Río Hato y de esta manera, cumplir con la normativa ambiental (Decreto 1594 de 1984, Decreto 3930 de 2010) y al mismo tiempo garantizar una mejor calidad de vida a la comunidad tomasina.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia de un sistema de filtración usando cascarilla de café modificada con nanopartículas de plata para la remoción de coliformes totales y fecales en agua cruda.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar física, química y microbiológicamente una muestra de agua cruda para determinar sus condiciones iniciales.

Evaluar la eficiencia del sistema de filtración utilizando cascarilla de café modificada con nanopartículas de plata sintetizada a partir de borohidruro de sodio.

Evaluar la eficiencia del sistema de filtración utilizando cascarilla de café modificada con nanopartículas de plata sintetizada a partir de té verde aplicando la química verde.

Comparar la eficiencia de las nanopartículas de plata bajo los diferentes mecanismos de síntesis en los sistemas evaluados y el uso final del agua de acuerdo con los requerimientos establecidos en la normativa ambiental vigente.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Agua cruda. El agua es el compuesto químico más abundante en el planeta tierra, cubre aproximadamente tres cuartas partes de ella; el 97% es agua salada y se encuentra en océanos y mares; el 3% es agua dulce y solo el 1% es accesible, pues el 2% restante se encuentra en estado sólido en campos y plataformas de hielo en latitudes próximas a los polos. Por otra parte, el agua dulce accesible se encuentra en humedales y acuíferos subterráneos (Gómez, Danglot, & Vega, 2010).

La molécula de agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, además, es el compuesto químico de mayor importancia para la vida humana, pues es utilizada en procesos químicos que ocurren en la naturaleza o se llevan a cabo en la industria (Ojeda, 2012).

Por otra parte, el agua cruda es aquella que no ha pasado por procesos físicos, químicos o biológicos, es decir, que no ha sido sometida a un proceso de tratamiento, por lo tanto, no se considera apta para el consumo humano (Rotoplas, 2019).

2.1.2 Agua Potable. Según la Organización Mundial de la Salud, el agua potable es aquella que no genera riesgo a la salud humana, ya que por sus características físicas, químicas y biológicas es adecuada para el consumo humano y para todo uso doméstico habitual (OMS, 2018).

Las características del agua se determinan mediante parámetros fisicoquímicos y biológicos, estos a su vez son indicadores de la calidad del agua. En la tabla 1 se pueden apreciar los principales parámetros para determinar la calidad del agua.

Tabla 1. *Indicadores de la calidad del agua*

<i>Parámetros físicos</i>	<i>Sólidos, turbiedad, color, olor, sabor, temperatura.</i>
<i>Parámetros químicos</i>	Aceites y grasas, conductividad eléctrica, alcalinidad, cloruros, dureza, pH, sodio, sulfatos.
<i>Parámetros biológicos</i>	Algas, coliformes termotolerantes, coliformes totales, protozoos, virus.

Nota: * Adaptado de “Organización Mundial de la Salud”. Guías para la calidad del agua de consumo humano. 4a edición; 2018.

2.1.3 Tratamiento de agua potable. El agua cruda contiene impurezas suspendidas y disueltas que no permiten que sea apta para el consumo humano, por esta razón se han desarrollado diversos métodos para su purificación y de esta manera obtener agua potable (Caminati & Caqui, 2013). Por otra parte, el agua tratada es aquella que mediante métodos de purificación sus características físicas, químicas y biológicas han sido cambiadas con el fin de ser apta para consumo humano (Villareal, 2018).

El tratamiento de agua potable se realiza mediante sistemas convencionales y no convencionales. Los sistemas convencionales son llevados a cabo en plantas de tratamiento de agua potable mediante procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Por otra parte, los sistemas no convencionales hacen referencia a los mecanismos de fácil acceso, poco valor monetario y realizados con materiales encontrados en la zona de estudio (Villareal, 2018).

2.1.3.1 Filtración en múltiples etapas (FiME). La filtración en múltiples etapas es una tecnología que consiste en la combinación de procesos de filtración utilizando materiales como grava y arena. Esta tecnología puede estar conformada por dos o tres procesos de filtración: filtros gruesos dinámicos, filtros gruesos y filtros lentos de arena. Dicho sistema es aplicado para

poblaciones rurales o pequeñas localidades ya que es una tecnología sencilla y eficiente que puede producir agua con baja turbiedad, libre de impurezas suspendidas y libre de microorganismos (OPS, 2005)

2.1.3.1.1 Filtros gruesos dinámicos (FGDi). Consiste en dos o más unidades en paralelo compuestas por tres capas de grava de diferente tamaño, gruesa en la parte inferior y fina en la superficie. Esta unidad contribuye al mejoramiento de la calidad de agua y protege a las demás unidades de tratamiento de cargas excesivas de sólidos suspendidos. También es utilizada para reducir picos altos de turbiedad. (OPS, 2005).

2.1.3.1.2 Filtración gruesa (FG). Los filtros gruesos pueden ser de flujo horizontal o vertical. Esta unidad consiste en un compartimiento donde se ubica un lecho filtrante de grava, el tamaño del diámetro de la grava va disminuyendo con la dirección del flujo (OPS, 2005).

2.1.3.1.3 Filtración lenta en arena (FLA). Esta unidad consiste en un lecho de arena fina, soportada en una capa de grava. El agua pasa lentamente a través de la cama porosa de arena y drena por el fondo mediante tuberías perforadas. Este proceso tiene como objetivo principal remover organismos patógenos de forma natural, es decir, sin el uso de sustancias químicas (OPS, 2005).

2.1.3.1.4 Criterios de diseño recomendados para los FiME. Los FiME son una tecnología que se ha aplicado desde hace varios años y aún sigue en la actualidad, sin embargo, son pocas las especificaciones acerca del diseño de estos. En la tabla 2 se pueden observar los criterios

recomendados en la Guía Para Diseño de Sistemas de Tratamiento de Filtración en Múltiples Etapas (OPS, 2005).

Tabla 2. Resumen de valores de diseño para los FiME

Parámetro	FGDi	FGA	FLA
Caudal de diseño	QMD	QMD	QMD
Período de operación (h/d)	24	24	24
Borde Libre (m)	0.2	0.3	0.2 - 0.3
Altura sobrenadante de agua	-	0.1 - 0.2	1 - 1.5
Relación largo/ancho	3:1 - 6:1	2:1	-
Altura lecho filtrante (m)	0.6	0.6 - 0.9	1 - 1.5
Altura lecho de soporte (m)	0.3	0.3	0.1 - 0.3
Velocidad de filtración (m/h)	2 - 3	0.3 - 0.6	0.1 - 0.2

Nota: * Las abreviaturas QMD hacen referencia al caudal máximo diario en m³/s. Adaptado de “Organización Panamericana de la Salud”. Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas; 2005.

2.1.3.2 Ventajas y limitaciones de los FiME. La filtración en múltiples etapas es una alternativa viable para mejorar el abastecimiento de agua en comunidades rurales o pequeños municipios, por esta razón es importante conocer sus ventajas y limitaciones.

2.1.3.2.1 Ventajas de los FiME. Los sistemas de filtración en múltiples etapas se caracterizan por su tecnología sencilla y de fácil acceso. Dentro de sus principales ventajas se encuentra la facilidad de construcción y su eficiencia para la remoción de parámetros como turbiedad, sólidos y microorganismos patógenos. En la tabla 3 se puede observar a más detalle las ventajas que presentan los FiME (Cooperación Suiza en América Central, 2014).

Tabla 3. *Ventajas de los FiME*

<i>Ventajas</i>	<i>Descripción</i>
<i>Calidad de agua tratada</i>	Excelente solución para mejorar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua.
<i>Facilidades de construcción</i>	Su diseño es relativamente simple, se requieren materiales de fácil acceso y mano de obra local. No requiere equipo especializado.
<i>Costos de construcción</i>	No requiere de materiales importados, pues las unidades de filtración se pueden construir con materiales y mano de obra local.
<i>Facilidad de operación y mantenimiento</i>	Personas con un nivel de escolaridad básico pueden operar y mantener el sistema, después de un corto periodo de capacitación.
<i>Limpieza</i>	El proceso de limpieza es simple, sin embargo, es laborioso y puede ser realizado por la misma comunidad.
<i>Confiabilidad</i>	Los riesgos por fallas mecánicas son bajos, sin embargo, si llegan a ocurrir se pueden resolver sin interrupción del servicio.

Nota: * Adaptado de “Cooperación Suiza en América Central”. La filtración en múltiples etapas en Nicaragua y Honduras; 2014.

2.1.3.2.2 Limitaciones de los FiME. Las principales limitaciones en los filtros de múltiples etapas son los niveles de contaminación que exceden la capacidad de tratamiento y las condiciones que inhiben o reducen la eficiencia (Sanchez, Sanchez, Galvis, & Latorre, 2007).

Como se mencionó anteriormente, los niveles de contaminación son una de las limitaciones que presentan los FiME, pues dichos niveles pueden llegar a exceder la capacidad de tratamiento. Es por esto, que antes de seleccionar los FiME como alternativa de tratamiento se debe realizar una caracterización fisicoquímica y microbiológica de la fuente de abastecimiento, pues esta se debe ajustar a las normas de calidad de agua cruda requeridas para el tratamiento. Los principales parámetros a tener en cuenta son la turbiedad y microorganismos patógenos como coliformes fecales. Sin embargo, en la tabla 4 se describe brevemente el resto de los parámetros a considerar para la selección de dicho sistema.

Tabla 4. *Niveles de contaminación que exceden la capacidad de tratamiento*

Parámetros	Descripción
Sólidos suspendidos y turbiedad	Altos niveles de turbiedad pueden ocasionar dificultades en el tratamiento, pues pueden generar bloqueos prematuros en las unidades de filtración lenta.
Hierro y manganeso	Una baja concentración de hierro mejora la capacidad de remoción de componentes orgánicos. Sin embargo, concentraciones altas pueden contribuir a la colmatación en las unidades de filtración lenta.
Algas	El crecimiento masivo de algas genera colmatación rápida en los filtros.
Materia orgánica natural	La unidad de filtración lenta presenta baja eficiencia en la remoción de color y carbono orgánico.
Alta contaminación microbiológica	La filtración en múltiples etapas presenta baja eficiencia en la remoción de microorganismos patógenos y por lo tanto no puede garantizar agua de buena calidad para consumo humano.

Nota: * Adaptado de “Sánchez, Sánchez, Galvis, & Latorre”. Filtración en múltiples etapas; 2007.

Otra limitación de los FiME son las condiciones que inhiben y reducen la eficiencia del tratamiento, estas condiciones están relacionadas a los parámetros de temperatura, nutrientes y oxígeno disuelto de la fuente a tratar. En la tabla 5, se explica brevemente la razón por la que cada parámetro podría reducir la eficiencia del sistema.

Tabla 5. *Condiciones que inhiben o reducen la eficiencia del proceso de tratamiento*

Parámetros	Descripción
<i>Baja temperatura</i>	Las bajas temperaturas pueden incrementar la viscosidad del agua generando una reducción en la actividad bioquímica en el lecho de arena.
<i>Nutrientes</i>	Los microorganismos presentes en el medio filtrante requieren nutrientes (carbono, nitrógeno, fósforo y azufre) para su metabolismo y crecimiento.
<i>Oxígeno disuelto</i>	Una alta cantidad de material biodegradable genera reducción en los niveles de oxígeno disuelto, y si el nivel de dicho parámetro es demasiado bajo puede generar condiciones anaeróbicas indeseables en la biopelícula del filtro, ocasionando a su vez mal olor y sabor del agua.

Nota: * Adaptado de “Sánchez, Sánchez, Galvis, & Latorre”. Filtración en múltiples etapas; 2007.

2.1.4 Cascarilla de café. La cascarilla de café, también conocida como el pergamino de café es la parte que cubre el grano después de la capa mucilaginosa, dicho pergamino representa aproximadamente el 12% del grano de café en base seca. Por otra parte, el grano está conformado por la cascara, la pulpa y el mucilago (figura 1). La cascarilla de café se caracteriza por su gran contenido de lignina, pentosanos, sílice, cenizas y celulosa. Esta última es importante para la síntesis de nanopartículas de plata, ya que posee una carga parcial negativa que facilita la interacción electrostática con iones de metales de transición electropositivos como la plata (Manals, Salas, & Penedo, 2018).

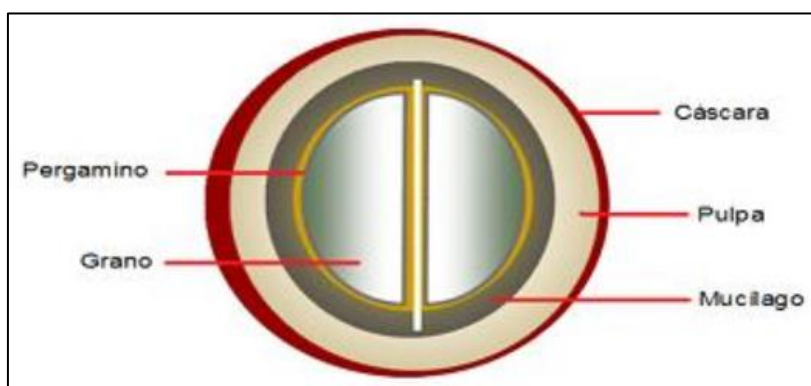


Figura 1. Partes de un grano de café
Adaptado de Manals, Salas, & Penedo, 2018.

En la tabla 6 se puede observar porcentualmente la cantidad de humedad, ceniza, carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno de la cascarilla de café (Manals, Salas, & Penedo, 2018).

Tabla 6. *Caracterización de la cascarilla de café*

	Humedad (%)	Volátiles (%)	Ceniza (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N(%)
Cascarilla de café	10.1	82	1.2	50.3	5.3	43.8	<1

Nota: * Adaptado de “Manals, Salas, & Penedo”. Caracterización de la biomasa vegetal "cascarilla de café"; 2018.

2.1.5 Té verde. La planta *camellia sinensis* es utilizada para elaborar té a partir de sus hojas y brotes, de dicha especie proviene el té verde, especialmente de las hojas jóvenes.

El té verde contiene compuestos fenólicos como catequinas (galato de epigallocatequina, galato de epicatequina y epicatequina), ácidos fenólicos como el ácido cafeico, taninos gálicos como el ácido gálico, flavonoides y proantocianidinas. También está compuesto por proteínas y aminoácidos como la L-teanina, polisacáridos e hidratos de carbono y vitaminas B y C (Dieti Natura, s.f.).

Actualmente el té verde es utilizado para la síntesis de nanopartículas debido al contenido de polifenoles presentes, estos desempeñan un papel importante en la síntesis de nanopartículas estables. Por otra parte, los polisacáridos y proteínas son los responsables en la producción de nanopartículas de diferentes formas (Tamilarasi & Meena, 2020).

2.1.6 Nanopartículas de plata. La nanotecnología hace referencia a la producción y aplicación de estructuras o dispositivos de forma y tamaño de materiales a escala nanométrica, entre 0,2 nm a 100 nm. Su aplicación se desarrolla en campos como la informática, imágenes, catálisis químicas, cosméticos, medicina, síntesis de materiales, entre otros (Cardoso, 2016). Por otra parte, la plata es un elemento químico de número atómico 47 y su símbolo es Ag, se considera un efectivo agente

antimicrobiano y por esta razón desde la antigüedad ha sido utilizada para la desinfección del agua (Tarazona & Peña, 2011).

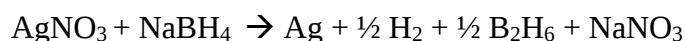
Las nanopartículas de plata (AgNPs) presentan propiedades como bactericidas, coloración, reactividad y relación área/volumen, las cuales dependen de la forma y tamaño (Tarazona & Peña, 2011).

2.1.7 Síntesis química de nanopartículas. Existen diferentes métodos para sintetizar nanopartículas, sin embargo, el enfoque central está dirigido en tener un control en el tamaño de la nanopartícula, su distribución de tamaño, morfología, cristalinidad y propiedades. La síntesis química es uno de los métodos más utilizados por su alto potencial para ser escalado a nivel industrial. Así mismo, permite preparar nanopartículas a gran escala y con un tamaño muy homogéneo. Los principales procesos de síntesis químicos son reducción química, proceso sol-gel, microemulsión, entre otros. Por otra parte, la síntesis se lleva a cabo mediante dos etapas principales; nucleación y crecimiento, además se utilizan componentes como el precursor metálico, agente reductor y agente estabilizante. Sin embargo, este método requiere de atención especial ya que se pueden generar subproductos contaminantes y de esta manera generar impactos negativos al medio ambiente (Sánchez, 2017).

2.1.7.1 Reducción química. La síntesis por reducción química consiste en la adición del agente reductor en la solución acuosa de la sal metálica y en presencia del agente estabilizante. Cabe destacar que la elección del agente reductor es sumamente importante, ya que este puede afectar significativamente la velocidad de nucleación y el crecimiento de la partícula, influyendo a su vez

en la morfología, tamaño y distribución de las nanopartículas. Dentro de los agentes reductores más usados están el borohidruro de sodio, citrato de sodio y alcoholes (Hernández, 2013).

Cuando se realiza la síntesis de nanopartículas de plata por dicho método, utilizando como precursor metálico el nitrato de plata y como agente reductor el borohidruro de sodio, se espera la siguiente reacción química:



El borohidruro de sodio juega un papel importante en el crecimiento de las nanopartículas, ya que este también cumple la función de estabilizar las partículas (Vargas & et al, 2017).

2.1.8 Síntesis verde de nanopartículas. La síntesis verde de nanopartículas o también conocida como síntesis biológica, hace referencia a la síntesis mediante el uso de microorganismos, biomasa de microorganismos, plantas o sus extractos y también mediante la participación de proteínas, azúcares, fenoles y otras enzimas. Este método, representa una alternativa amigable con el medio ambiente, ya que reemplaza el uso de químicos tóxicos por materiales que se encuentran en la naturaleza. Además, es simple, rentable, ecológica y estable (Hernández, 2013).

2.2 Estado del Arte

A nivel mundial, la necesidad de desarrollar métodos eficientes y económicos para purificar el agua es un tema que se ha tratado desde hace varios años. Los sistemas de filtración en múltiples etapas (FiME) son una alternativa eficiente para tratar el agua, pues son reconocidos como una tecnología sencilla, confiable y eficiente ya que logran producir agua con baja turbiedad, libre de impurezas suspendidas y libre de entero-bacterias, entero-virus y quistes de protozoarios. Por esto,

Pereira E. et Al (2013), realizaron un estudio sobre un sistema de filtración en múltiples etapas utilizando como materiales filtrantes carbón activado y mantas sintéticas no tejidas. Para esto, se realizaron 4 ensayos teniendo como fases iniciales un prefiltro dinámico y un prefiltro vertical de flujo ascendente en todas las pruebas, variando únicamente la última etapa conformada por un filtro lento de arena, en cuyo caso se usó uno como sistema control, el segundo tuvo una capa de carbón activado y arena, el tercero contenía una capa de manta no sintética y arena y por último se tuvo un filtro que combinó los tres materiales. Los autores concluyeron que el filtro con capas combinadas fue aquel con mayor eficiencia en cuanto a remoción de turbidez con un 85%, remoción de 90 Uh de color aparente y remoción de materia orgánica expresada en términos de oxígeno consumido ($0,5 \text{ mg.l}^{-1}$).

Posteriormente, Mushila C. et Al. (2016) realizaron un diseño hidráulico para optimizar la capacidad de tratamiento en las unidades de un sistema de filtración multietapa. Para ello llevaron a cabo un estudio de planta piloto que consistió en dos filtros de grava dinámicos (DGF), tres filtros de desbaste de flujo horizontal (HRF) y dos unidades de filtro de arena lento (SSF). La planta fue monitoreada por 98 días continuos, y se evaluaron parámetros de calidad como coliformes fecales y totales, sólidos suspendidos, turbiedad, pH, temperatura, hierro y manganeso. Los autores concluyeron que el sistema logró remover en promedio 98% de coliformes fecales, 96% de coliformes totales, 70% de hierro y un 64% de manganeso, lo cual lo atribuían a la maduración del lecho filtrante (desde el día 26 en adelante) y a la baja tasa de filtración en las unidades SSF ($0,08 \text{ m/h}$) y HRF ($0,5 \text{ m/h}$). Por otra parte, con los resultados obtenidos se logró cumplir con los criterios establecidos según la organización mundial de la salud para parámetros como turbiedad (5 UNT), pH (7,5), y color (15 mg/l pt). En cuanto a parámetros microbiológicos como coliformes totales y fecales no se logró cumplir con la normativa a pesar de haber obtenido

porcentajes de remoción altos, por ello los autores recomiendan implementar una unidad de desinfección y de esta manera cumplir con la normativa vigente.

En el mismo año, Torres C. et AL. diseñaron un prototipo de sistema de tratamiento de agua para zonas rurales colombianas, denominado “Torre de tratamiento”. El sistema estuvo compuesto por cuatro tanques interconectados con accesorios hidráulicos y soportados en una base metálica con el fin de brindar estabilidad al prototipo. El primer tanque en orden descendente contenía en su interior piedra de alumbre y un mezclador metálico manual para llevar a cabo el proceso de clarificación del agua. Una vez clarificada el agua, continuaba el proceso de filtración en los tanques dos, tres y cuatro, los cuales contenían arena fina, arena gruesa, grava gruesa, gravilla fina, carbón activado y piedra pómez. Una vez construida la torre procedieron a tratar el agua. Las condiciones iniciales del agua presentaron una turbiedad de 60 UNT, 9 UFC/100 mL de coliformes fecales, 30 UFC/100 mL de coliformes totales, 22,5 UPC de color aparente y un pH de 6,9. Finalmente, el sistema logró remover 99,9% de coliformes fecales y totales, 98% de turbiedad y 83% de color aparente. En cuanto al pH se presentó un aumento (7,4 unidades de pH) debido al uso de piedra pómez y otras calizas en el proceso de filtración. Con base en lo anterior, los autores concluyeron que el sistema propuesto puede considerarse como una solución viable para tratar la problemática de agua para consumo humano en zonas rurales y de esta manera prevenir enfermedades de origen hídrico.

En el 2017, Gómez L. & Moreno M. diseñaron un sistema de filtración en múltiples etapas, para eliminar sólidos disueltos y microorganismos patógenos del agua de la vereda Guamal (Caldas, Colombia). Para el diseño del sistema, realizaron dos unidades de Filtros gruesos dinámicos (FGDi), una de Filtro grueso ascendente (FGA) y dos de Flujos lentos (FLA) y tuvieron en cuenta factores como la proyección de la población, caracterización microbiológica y física del

agua, y cálculo del caudal de diseño, pues fue un sistema diseñado a escala real. Finalmente, las autoras recomiendan que se debe realizar un mantenimiento constante a las unidades de tratamiento, pues como no contaron con una unidad previa para retener sólidos y demás el sistema se saturó muy rápido, sin embargo, lo consideraron como una alternativa viable económicamente y a nivel de implementación para comunidades de escasos recursos.

Con base en lo anterior, los sistemas de filtración son una alternativa eficiente para tratar el agua, sin embargo, para efectos de mayor remoción en organismos patógenos se recomienda añadir una unidad de desinfección al final del sistema. Existen diversos tratamientos de desinfección de agua, uno de ellos son el uso de nanopartículas de plata. Por esto, Dankovich T. & Gray D. (2011) realizaron un estudio en el que impregnaron hojas de papel absorbente secante con nanopartículas de plata para la eliminación de bacterias patógenas. El papel absorbente contiene fibras de celulosa, y es en estas donde se depositaron las nanopartículas de plata. En consecuencia, encontraron que las hojas impregnadas con nanopartículas de plata sí presentan propiedades antibacterianas contra bacterias patógenas como *Escherichia coli* (*E. coli*) y *Enterococcus faecalis* (*E. faecalis*), con valores de reducción logarítmica de más de log 6 y log 3, respectivamente. Además, se mantuvo el límite permisible de plata según la EPA y OMS (0.1 ppm).

En Colombia, Tarazona Chaparro & Peña Vesga (2011) elaboraron un filtro tipo cartucho con bionanocompositos de fibras de fique y nanopartículas de plata como material filtrante para remover microorganismos patógenos del agua, teniendo en cuenta las propiedades bactericidas de las nanopartículas de plata y la gran cantidad y facilidad de acceso al material polimérico natural (fique). El agua cruda contenía aproximadamente 2000 UFC/100mL de coliformes totales y 2500 UFC/100mL de coliformes estándar, una vez tratada el agua se logró remociones del 100% y 94,9% en coliformes totales y coliformes estándar respectivamente. Siendo así, concluyeron que

los biocompositos de fique con nanopartículas de plata son una alternativa económica para tratar el agua cruda contaminada con microorganismos patógenos, pero la eficiencia del material filtrante usado depende del peso del material y la cantidad de ciclos de recirculación.

Posteriormente, Noriega Treviño et Al. (2012) evaluaron el uso de nanopartículas metálicas para la remoción de microorganismos patógenos (*E. coli* y *E. faecalis*) en aguas con composición química diferente. Para esto, compararon la efectividad de nanopartículas de óxido de zinc, nanopartículas de cobre, nanopartículas de plata de 3.5 nm, nanopartículas de 14 nm y nanocompósito de dióxido de titanio con plata Ag-TiO₂; encontrando que las nanopartículas de plata presentan el mayor efecto de remoción, obteniendo concentraciones mínimas inhibitorias de 13,37 µg/mL para *E. Coli* y 40,13 µg/mL para *E. faecalis* con nanopartículas de tamaño de 14 nm, y con las nanopartículas de tamaño de 3 nm se obtuvieron concentraciones mínimas inhibitorias de 6,68 µg/mL para *E. Coli* y 13,37 µg/mL para *E. faecalis*. Finalmente, concluyeron que entre menor sea el tamaño de las nanopartículas, mayor es el efecto antibacterial. Por otro lado, las nanopartículas de cobre fueron eficientes contra la *E. faecalis*, mientras que las nanopartículas de óxido de zinc no presentaron propiedad alguna para eliminar las bacterias de estudio.

En el 2013, Karumuri A. et Al. impregnaron nanopartículas de plata en espumas de carbono con el fin de analizar la eficiencia antibacteriana frente a la bacteria *E. coli*. Las nanopartículas se depositaron sobre la espuma mediante reducción química del nitrato de plata en presencia de dimetil sulfóxido y citrato de sodio Tri, de esta manera obtuvieron una concentración promedio de plata entre 1,5% a 2,5% en peso, y nanopartículas de tamaño promedio de 5 nm. Por otra parte, la prueba antibacteriana se probó mediante dos métodos; rotación en contenedores de almacenamiento y en filtración tipo cartucho. Para ambos casos se usaron muestras de espuma en forma de disco con un espesor de 2,5 mm y un diámetro de 11,5 mm. Finalmente, los autores

concluyeron que el tratamiento por filtración es el enfoque más eficiente ya que logró remover el 90% de bacterias dentro de dos percolaciones de 5 minutos, y una remoción completa mediante tres filtraciones. Por otra parte, los autores recomiendan realizar modificaciones en el método de rotación para mejorar la humectabilidad del sustrato poroso y de esta manera lograr una mayor eficiencia antibacteriana.

En el mismo año, Quang D. et Al. (2013) evaluaron el uso de nanopartículas de plata en perlas de sílice (Ag-NPB) con el fin de analizar la eficiencia antibacteriana frente a la bacteria *E. coli*. La síntesis se llevó a cabo mediante reducción química utilizando nitrato de plata (0,5 M) y borohidruro de sodio (0,05 M). Siendo así, obtuvieron nanopartículas de tamaño entre 4 nm y 13 nm, las de menor tamaño se ubicaron dentro de los poros de sílice mientras que las de mayor tamaño se ubicaron en la superficie del sustrato. Por otra parte, la relación en peso de plata a sílice fue bastante pequeña (0,38%). Con base en lo anterior, diseñaron un sistema de filtración para evaluar la capacidad antibacteriana de las Ag-NPB, para ello utilizaron una tubería de plástico como una columna de filtro y la llenaron parcialmente con 10 g de Ag-NPB, la velocidad de flujo fue controlada por una bomba manteniendo un caudal de 30 mL/min. También, evaluaron el efecto del caudal en la eficacia antibacteriana, para ello utilizaron la misma columna de filtro, pero la llenaron con 24 g de Ag-NPB y el flujo de agua fue controlada por una bomba a caudales entre 75 a 780 mL/min. Finalmente, en las pruebas de flujo lograron inactivar el 100% de *E. coli* dentro de los 5 minutos de contacto con microesferas de sílice que contenían menos del 0,5% de plata. En cuanto a la capacidad antibacteriana lograron eliminar más del 99,9% de *E. coli* a medida que pasaban 45 L de agua contaminada, sin embargo, se presentó una disminución en la eficacia de las Ag-NPB cuando se trataron más de 90 L de agua, ya que las Ag-NPB se desactivaron por acumulación de *E. coli* sobre su superficie. Por otra parte, cuando pasaron 5 L de agua contaminada

a través del filtro se presentó liberación de plata en el efluente, sin embargo, la concentración de plata liberada estuvo dentro de los niveles máximos de contaminantes en agua potable según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (0,1 mg/L).

Posteriormente, Gutiérrez A. (2014) diseñó un filtro tipo cartucho utilizando como medio filtrante cenizas de cascarilla de arroz impregnadas con nanopartículas de plata como método para purificar el agua. El objetivo de este filtro fue comparar la eficiencia del material filtrante con el carbón activado comercial utilizado normalmente en los filtros. En consecuencia, analizó la eficiencia de la ceniza en concentraciones de 0.25%, 0.5% y 1% (w/w) de plata y utilizó diferentes diámetros de partículas comprendidos entre 0.106 a 1.180 mm. Finalmente, la autora concluyó que la ceniza de cascarilla de arroz impregnada con 0.5% (w/w) de nanopartículas de plata se constituye como un buen material filtrante para los filtros de agua obteniendo 99.99% de remoción en *E. coli*. Sin embargo, al medir el porcentaje residual de plata en el agua filtrada esta no cumplió con la normativa, por lo cual, recomiendan disminuir el flujo del agua para reducir el porcentaje de plata residual.

Por otra parte, Montoya N. et Al. (2014) implementaron un sistema piloto de tratamiento de aguas usando un método de filtración, con el fin de estudiar la efectividad de las nanopartículas de plata en la purificación del agua mediante el análisis de parámetros como pH, temperatura y turbidez. Las nanopartículas se depositaron sobre lechos de arena y antracita, sometiéndolas a un proceso de remojo y secado y se ubicaron en columnas verticales simulando un filtro para poder depositar el flujo de agua. Siendo así, encontraron que la turbidez se mantuvo dentro de los límites permisibles de la OMS (1 NTU y 5 NTU), y las nanopartículas de plata presentaron características antibacterianas. En cuanto al pH, este estuvo influenciado por los cambios de temperatura, por lo

cual se recomienda mantener una temperatura del agua entre 20 a 25 °C para disminuir las variaciones del pH.

En el 2018, Sánchez Álvarez, K.L. realizó un estudio para evaluar la desinfección de *E. coli* en sistemas de captación de agua a partir de geomembranas impregnadas con nanopartículas metálicas. Para ello utilizó cinco geomembranas de polietileno (Silver plus 200 2E, Silver Plus 200 2PP, Silver Plus 500 PP, Silver Plus 1000 PP y PE4F2 400) impregnadas con nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y plata (Ag). La eficacia antimicrobiana se determinó mediante concentraciones mínimas inhibitorias (CMI) y concentraciones mínimas bactericidas (CMB), siendo así, el autor concluye que la geomembrana Silver Plus 200E fue la más eficiente, ya que logró remover el 99% de *E. coli* a concentraciones de 60,93 mg/L de ZnO y 2,61 mg/L de Ag desde la segunda hora de tratamiento. Por otra parte, el valor de CMI se identificó a 15 mg/L de ZnO y 0,37 mg/L de Ag, estas fueron las concentraciones más bajas en las que se observó efectos sobre la bacteria, los autores afirman que la eficiencia de dicha geomembrana se debe a que las nanopartículas de ZnO y Ag se encontraban impregnadas en la superficie de la geomembrana, lo que genera mayor contacto con la membrana celular de la *E. coli*, por lo tanto, causa la muerte de manera más rápida. Con base en lo anterior, el autor concluye que este tipo de geomembrana es viable como método de desinfección de agua, sin embargo, recomienda evaluar el efecto de las nanopartículas con otros microorganismos característicos de aguas estancadas como *Salmonella* y *Entamoeba histolytica*.

En el mismo año, Romero Lara & Mejillón Salinas (2018) elaboraron dos filtros de barro recubiertos con nanopartículas de plata y óxido de grafeno para remover cadmio, cromo y coliformes fecales del agua del Río Chimbo, cuyos valores excedían los límites máximos permisibles. Para esto, se varió la concentración de óxido de grafeno (0.3% y 0.5%) y se utilizó

una mezcla de 80% barro 20% aserrín para mejorar la filtración. Finalmente, se obtuvo que el filtro con 0.5% de óxido de grafeno fue el que logró retener metales pesados como cromo, cobre y mercurio y redujo el porcentaje de coliformes totales contenidos en el agua del río.

Con base en lo anterior, las nanopartículas de plata son una alternativa eficiente para la remoción de microorganismos patógenos, sin embargo, realizar la síntesis de estas requiere el uso de productos químicos tóxicos, por esta razón se han buscado métodos que sean rentables y respetuosos con el medio ambiente. Por ello se han realizado diferentes estudios utilizando extracto de frutas o plantas para la síntesis de nanopartículas. En el 2013 López I. et AL. prepararon biocompositos de nanopartículas de plata utilizando fibra de algodón como soporte y té verde como agente reductor. También realizaron la caracterización de las nanopartículas de plata por medio de Microscopia Electrónica de transmisión de emisión de campo (FE-TEM). Para llevar a cabo la síntesis verde prepararon el extracto de té, agregaron 1,2 g de *Camellia sinensis* en 100 mL de agua destilada y dejaron en ebullición por 10 minutos. Seguidamente filtraron y dejaron enfriar. Posteriormente, cortaron las fibras de algodón en trozos pequeños y los sumergieron en una solución de nitrato de plata (1mM) por 10, 20 y 30 minutos. Después, sumergieron las fibras en una solución de 5 mL de extracto de té diluido 1:1 con agua destilada por media hora, 1 y 2 horas. Finalmente lavaron las fibras con agua destilada y dejaron secar a 40°C. Con base en lo anterior, obtuvieron nanopartículas de tamaño promedio de 5 nm y 11 nm para tiempos de impregnación de iones de plata de 20 y 30 minutos respectivamente, y un tiempo de reducción de 2 horas.

Por otra parte, en Perú, Feijoo Carrillo (2018) estudió la disminución de microorganismos patógenos como coliformes fecales, coliformes totales, *E. coli* y bacterias heterotróficas presentes en el río de La Esperanza Alta – Huaral (Perú) mediante la aplicación de nanopartículas de plata sintetizadas con *Rosmarinus officianalis* (Romero). Para esto, Feijoo elaboró las nanopartículas de

plata y las sintetizó con el romero obteniendo un tamaño de partícula de 55.6 nm. El autor obtuvo una reducción del 100% de coliformes fecales, coliformes totales y *E. coli* y del 99.8% para las bacterias heterotróficas.

En Colombia, Burbano Patiño (2018) llevó a cabo la síntesis de nanopartículas metálicas del tipo *core-shell* $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Ag}$ teniendo como soporte cascarilla de café y lignina, para evaluar su efecto bactericida y capacidad para absorber metales pesados. Las nanopartículas *core-shell* $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Ag}$ se sintetizaron mediante la microemulsión por micelas inversas mientras que las nanopartículas Fe_3O_4 se sintetizaron por el método de co-precipitación. Adicional a esto, Burbano utilizó como agentes reductores NaHB_4 y extracto de té verde, con el fin de comparar la efectividad entre el agente químico y natural. La autora concluyó que las nanopartículas *core-shell* $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Ag}$ tuvieron una eficiencia alta en cuanto a la síntesis, mientras que, las nanopartículas Fe_3O_4 presentaron algunas aglomeraciones. Por otra parte, la síntesis realizada con té verde a temperatura ambiente representó una alternativa eficiente, económica y viable a nivel ambiental.

Posteriormente, Pilaquinga F. et Al (2019) realizaron una síntesis verde de nanopartículas de plata sintetizadas mediante el extracto acuoso de las hojas de ajo. Para esto, implementaron como técnicas de calentamiento la placa y microondas con el fin de determinar la mejor. Siendo así, primeramente, prepararon el extracto de las hojas de ajo con agua destilada y lo sometieron a calentamiento. Seguido de esto, sintetizaron las nanopartículas de plata con nitrato de plata y el extracto acuoso mediante los dos métodos de calentamiento. Con la placa, la muestra se mantuvo en una agitación constante a 300 r.p.m por 1 hora; y con el microondas se mantuvo una potencia de 800 W durante 1 minuto. Posteriormente, se caracterizaron las nanopartículas de plata y se analizó su radio hidrodinámico. Los autores concluyeron que el extracto acuoso de las hojas de ajo es un buen agente reductor para la síntesis de nanopartículas de plata, teniendo como mejor técnica

de calentamiento el microondas, ya que su rapidez es mayor el tamaño promedio de las nanopartículas fue 9.9 ± 10.5 nm.

Finalmente, Campos A. et Al. (2019) evaluaron las propiedades del extracto acuoso de arándano como agente reductor para la síntesis de nanopartículas de plata, a concentraciones de 1mM y 10mM. Según lo anterior, se realizó la preparación del extracto de arándano para posterior realizar la síntesis de nanopartículas usando nitrato de plata con una concentración de 0.03M, así mismo, este compuesto se mezcló con el extracto acuoso de arándano con las concentraciones de 1mM y 10mM. Como resultados, se obtuvieron nanopartículas de plata con diámetro de 36.67 y 48.74 nm para la concentración de 1mM y 10mM respectivamente, determinando que la variación de la concentración molar del extracto es importante para mejorar la geometría y producción de la nanoestructura.

2.3 Marco Legal

A continuación, en la Tabla 7 se presentan algunos Decretos y Resoluciones de interés para la presente investigación, en los cuales se especifican los diferentes usos del agua, los valores máximos permisibles según la destinación, los criterios de calidad sobre agua potable, algunas especificaciones de diseño sobre sistemas de tratamiento del recurso hídrico, entre otros. Así mismo, el contenido detallado de cada normativa se encontrará en los apéndices del presente documento.

Tabla 7. Normativa relacionada con el recurso hídrico

Normativa	Descripción	Título/Capítulo	Artículo	Descripción
Decreto 1594 de 1984	Se reglamentan los usos del agua y residuos líquidos	Capítulo III: Destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas, marítimas, estuarias y servidas	30	Uso de agua para consumo humano y doméstico
			31	Uso de agua para preservación de flora y fauna
			32	Uso de agua para actividades agrícolas
			33	Uso de agua para actividades pecuarias
			34	Uso de agua para actividades recreativas
			35	Uso de agua para actividades industriales
			36	Uso de agua para transporte
		Capítulo IV: Criterios de calidad para la destinación del recurso	38	Criterios de calidad admisibles para uso doméstico y consumo humano (Apéndice A)
			40	Criterios de calidad admisibles para uso agrícola (Apéndice B)
			41	Criterios de calidad admisibles para uso pecuario (Apéndice C)
Decreto 3930 del 2010	Se consideran los usos, ordenamiento y vertimientos al recurso hídrico, así como vertimientos al suelo y alcantarillado	Capítulo IV: Se establecen los usos del agua; consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, estético, pesca, maricultura y acuicultura, y navegación y transporte acuático		
		Capítulo V: Criterios de calidad para la destinación del recurso hídrico		
Decreto 1076 del 2015	Compila y racionaliza las normas que rigen el sector ambiente	Título III, Capítulo III: Se establecen las disposiciones relacionadas con el recurso hídrico, su ordenamiento y vertimientos al agua, suelo y alcantarillado	2.2.3.3.2.1	Usos del agua tales como: consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, estético, pesca, maricultura, acuicultura, navegación y transporte acuático

Normativa	Descripción	Título/Capítulo	Artículo	Descripción
Resolución 2115 del 2007	Se señalan las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia de la calidad de agua para el consumo humano	Capítulo II: Se establecen las características físicas y químicas del agua para consumo humano	2	Valores máximos aceptables para cada una de las características físicas (Anexo 4)
			3	Valor máximo aceptable para la conductividad (1000 μ S/cm)
			4	Valor para el potencial de hidrógeno (6.5 y 9)
			5	Valores máximos aceptables de características químicas (Anexo 5)
		Capítulo III: Se establecen las características microbiológicas del agua para consumo humano	11	Valores máximos aceptables de características microbiológicas (Anexo 6)
Resolución 330 del 2017	Se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico	Título I: Aspectos generales	1	Requisitos técnicos a cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación relacionada con servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo.
		Título II: Requisitos técnicos, parámetros y procedimientos técnicos en los procesos de planeación, diseño, construcción, supervivencia técnica, puesta en marcha, operación y mantenimiento de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo		
		Capítulo 3, sección 3: Tecnologías de tratamiento de potabilización	114	Criterios de filtración convencional (Anexos 7 y 8)
			116	Criterios de filtración avanzada (Anexo 9)

Nota: * En la tabla se presenta una combinación de las normativas de interés para el presente trabajo.

3. Método

Para la realización y el desarrollo de la presente propuesta de investigación se llevó a cabo la siguiente metodología de trabajo:

3.1 Diagnóstico Ambiental y Caracterización Fisicoquímica

Inicialmente, se realizó un diagnóstico ambiental y un monitoreo de agua en la Finca El Limonal. Para la toma de muestras se tomaron como base las guías y requerimientos establecidos por el IDEAM, con el fin de determinar las condiciones del agua cruda procedente de la fuente hídrica del Río Hato, estableciendo como punto de muestreo una zona cercana a la captación. En la Tabla 8, se presentan los parámetros evaluados con sus respectivos métodos. Cabe resaltar que los análisis microbiológicos fueron realizados por el laboratorio SIAMA, acreditado por el IDEAM bajo Resolución 1277 de 2019 extensión Resolución 0150 de 2020.

Tabla 8. *Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de estudio*

Tipo Variable	Parámetro	Método
In situ	Temperatura	Electrométrico
In situ	pH	Electrométrico
In situ	Conductividad	Electrométrico
In situ	Turbidez	Nefelométrico
Ex situ	Coliformes Totales	SM. 9221 B
Ex situ	Coliformes Termotolerantes	SM. 9221 E
Ex situ	Escherichia coli	SM 9221 B, F

3.2 Diseño y elaboración del sistema de filtración

Una vez caracterizada el agua, se diseñó un sistema de filtración a escala laboratorio con sus respectivas unidades de tratamiento. El sistema trabajó con un caudal de salida de 15 mL/min con el fin de garantizar un tiempo de retención mínimo de 30 min en la unidad de desinfección. El filtro en múltiples etapas se realizó de forma vertical y se dimensionó a una escala 1:5, siguiendo los parámetros de diseño establecidos en el RAS 2017 y la guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas. Cabe aclarar, que no todos los criterios básicos de diseño recomendados en la guía se consideraron, ya que estos están diseñados para la implementación de una planta FiME, es decir a escala grande y no específicamente para un prototipo. En la tabla 9, se puede observar las profundidades del medio filtrante en cada unidad de tratamiento según la escala trabajada.

Tabla 9. *Dimensionamiento de las unidades de filtración a escala 1:5 según el RAS 2017*

PROFUNDIDAD DEL MEDIO	PROFUNDIDAD REAL	PROFUNDIDAD A ESCALA 1:5	
	RAS 2017 (cm)	RAS 2017 (cm)	Prototipo (cm)
FGDI	60	12	12
FG	40-90	8-18	9
FLA	80-100	16-20	17

Así mismo, el filtro contó con tres unidades de tratamiento: dos unidades de pretratamiento (FGDi y FG) y una unidad de tratamiento primario (FLA). Sin embargo, para lograr una mayor eficiencia en la remoción del sistema, se elaboró un filtro adicional en el que se depositó la cascarilla de café modificada con AgNPs que actuó como mecanismo de desinfección. Las nanopartículas de plata se sintetizaron a temperatura ambiente mediante dos métodos diferentes (reducción química y síntesis verde). En la Figura 2 se puede observar el esquema general del sistema de tratamiento mencionado anteriormente.

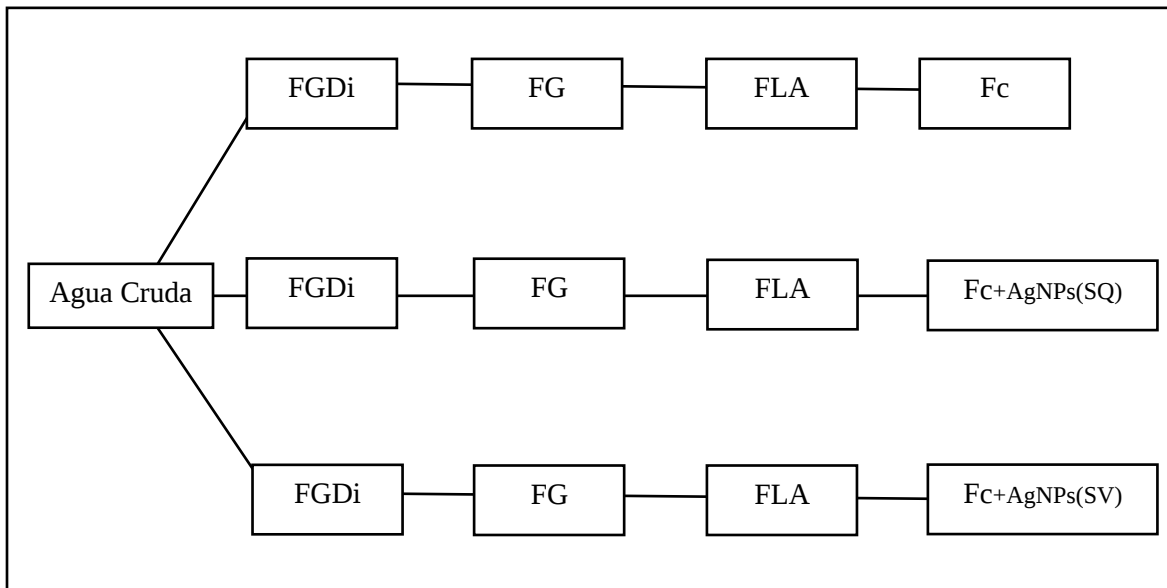


Figura 2. Diseño conceptual del sistema de filtración

Las abreviaturas de la figura 2 se relacionan a continuación, FGDí: Filtro grueso dinámico, FG: Filtro grueso, FLA: Filtro lento de arena, Fc: Filtro con cascarilla de café, Fc+AgNPs(SQ): Filtro con cascarilla de café + AgNPs (Síntesis Química), Fc+AgNPs(SV): Filtro con cascarilla de café + AgNPs (Síntesis Verde).

En la figura 3 se presenta el diseño del prototipo del sistema de filtración a escala laboratorio, conformado por 5 recipientes cilíndricos en acrílico de 4 mm con un diámetro de 20 cm, soportados sobre una base metálica de 170 cm de altura. El FGDí tiene una altura de 24 cm y contiene 3 capas de grava de distintos diámetros ubicadas de acuerdo con el flujo del agua de menor a mayor diámetro; el FG cuenta con 22 cm de altura y también está compuesto por 3 capas de grava distribuidas de mayor a menor diámetro; el FLA tiene 28 cm de altura y contiene grava gruesa, grava fina y arena; finalmente, el filtro con nanopartículas cuenta con una altura de 14 cm y está compuesto por grava gruesa, carbón activado y cascarilla de café (con o sin modificación). Cabe

mentar que, en cada unidad de filtración se agregó una capa de grava gruesa en la parte superior, con el fin, de obtener una mejor distribución del flujo de agua.

El sistema se conectó con accesorios hidráulicos en PVC de $\frac{1}{2}$ ", y contó con 6 válvulas de paso en la salida de los tanques para poder controlar el caudal. Por otra parte, en la parte inferior de los recipientes se dispuso tubería perforada para facilitar el flujo de agua entre los tanques.

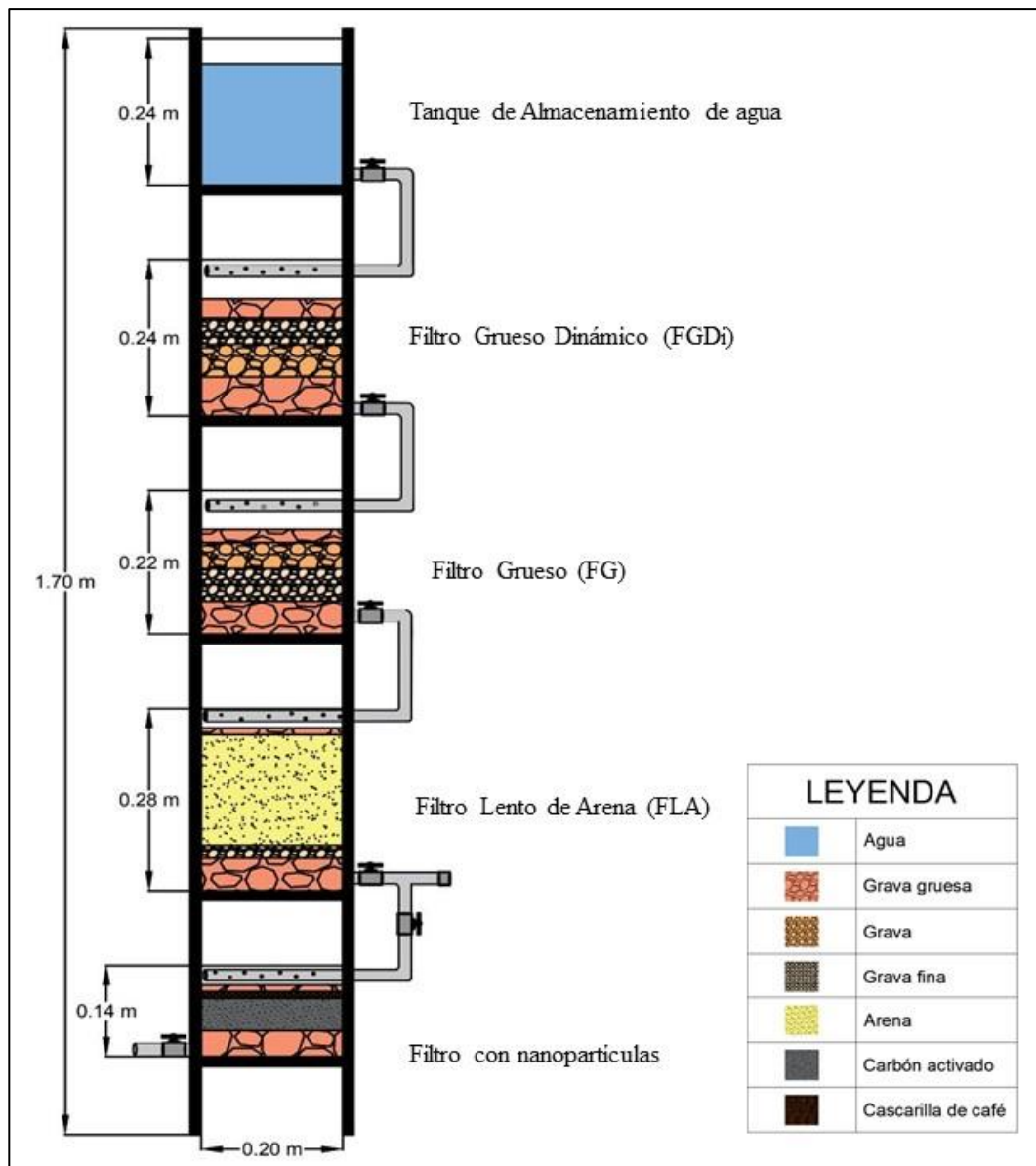


Figura 3. Diseño del prototipo del sistema de filtración a escala laboratorio

3.3 Síntesis de nanopartículas de plata en cascarilla de café

La síntesis de nanopartículas de plata se realizó mediante dos métodos: síntesis química, utilizando como agente reductor borohidruro de sodio y síntesis verde utilizando té verde como agente reductor. La impregnación se hizo en cascarilla de café debido a que en estudios previos demostró ser un material eficaz para la síntesis de nanopartículas (Guevara Bernal, 2020).

3.3.1 Síntesis de nanopartículas de plata en cascarilla de café aplicando el método químico.

La síntesis química se llevó a cabo mediante el método de precipitación utilizando como precursor el nitrato de plata y como agente reductor el borohidruro de sodio. En primer lugar, se preparó la cascarilla de café obtenida de la fábrica Café Santander ubicada en el municipio de Curití, Santander. Para ello, se limpió el material mediante procesos de lavado con agua y secado en horno. Seguidamente, se introdujo la cascarilla en una solución de nitrato de plata 3mM manteniendo en agitación durante 1 hora. Después, se sumergió en una solución de borohidruro de sodio 20mM en agitación durante 1 hora. Finalmente, se lavó la cascarilla y se dejó secando en horno durante 24 horas (Tarazona & Peña, 2011).

3.3.2 Síntesis de nanopartículas de plata en cascarilla de café aplicando la síntesis verde.

En la metodología de síntesis verde se utilizó como agente reductor el extracto de hojas de té verde. Para ello, se sumergieron 12 g de hojas de té en 1000 mL de agua y se dejaron en ebullición durante 10 minutos. Seguidamente, se filtró la solución para ser utilizada posteriormente.

La cascarilla de café se preparó tal y como se mencionó en el ítem anterior. Luego, se sumergió en la solución de nitrato de plata 3 mM durante 1 hora, manteniendo en agitación. Después, se

introdujo el material en la solución de té verde en agitación durante 2 horas. Finalmente, se lavó la cascarilla y se dejó secando en horno durante 24 horas (López et al., 2013).

3.4 Caracterización de las nanopartículas de plata

Se esperaba realizar la caracterización de las AgNPs mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), para obtener información acerca de las características morfológicas y topográficas del material. Sin embargo, por inconvenientes en el equipo no se pudo llevar a cabo dicho análisis.

3.5 Análisis de la eficiencia del sistema

Una vez desarrollado el montaje experimental, el agua se hizo pasar por el sistema de filtración. Como se mencionó anteriormente, se determinaron tres sistemas diferentes, compuestos por el FiME y el filtro de desinfección con las variantes de la cascarilla. El primer sistema sirvió como control, ya que, en este se incluyó la cascarilla sin modificación; en el segundo, se cambió la cascarilla sin alterar por la cascarilla modificada mediante la síntesis química; finalmente, en el tercero, se adicionó la cascarilla modificada mediante síntesis verde. Seguido de esto, se tomaron muestras del efluente para posteriormente realizar la caracterización respecto a turbiedad, pH, coliformes fecales, coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* siguiendo los lineamientos del IDEAM. Finalmente, se evaluó la eficiencia del prototipo en la remoción de las variables anteriormente mencionadas, y se comparó la eficiencia de cada sistema y método de síntesis para definir el uso final del agua a partir del Decreto 1594 de 1984 y el Decreto 3930 de 2010.

4. Resultados y Discusión

4.1 Diagnóstico Ambiental y Caracterización Físicoquímica

4.1.1 Diagnóstico Ambiental. La Universidad Santo Tomás regional Bucaramanga cuenta con tres sedes localizadas en los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Piedecuesta. En esta última se encuentra ubicado el Centro de Desarrollo Agroalimentario-Campus El Limonal, específicamente a una elevación de 1.005 msnm en las coordenadas de 7°00'28.53" N 73°03'04.97" O. El campus abarca una extensión de 9,8 hectáreas en las que se desarrollan actividades como ganadería silvopastoril, agricultura urbana, piscicultura, cunicultura, cultivos de cacao, entre otros.

En la finca no existe la prestación del servicio de acueducto y alcantarillado, por lo cual, el abastecimiento se realiza mediante un sistema de captación de agua proveniente del Río Hato. Dicha captación es posible por una desviación artificial, la cual conecta el río con una pileta de almacenamiento y un canal artificial ubicado dentro de la finca.

El agua captada se almacena en una pileta (Figura 4a) y es impulsada a un tanque elevado de 5000 L (Figura 4b) por medio de una bomba de 5HP.

Desde el tanque elevado, el agua es distribuida por gravedad en toda la finca para su uso en actividades de aseo, mantenimiento y servicio de baños. Para controlar el nivel del agua en el tanque, se cuenta con un hidroflo (sensor de capacidad) que permite el flujo de agua desde la pileta hasta el tanque.

Con respecto a las actividades agrícolas y piscícolas, se usa el agua que fluye por el canal artificial superficial (Figura 4c) que atraviesa la finca circulando de forma natural por acción de la gravedad. En algunas zonas de la finca el agua sigue su curso por un canal subterráneo (Figura 4d).

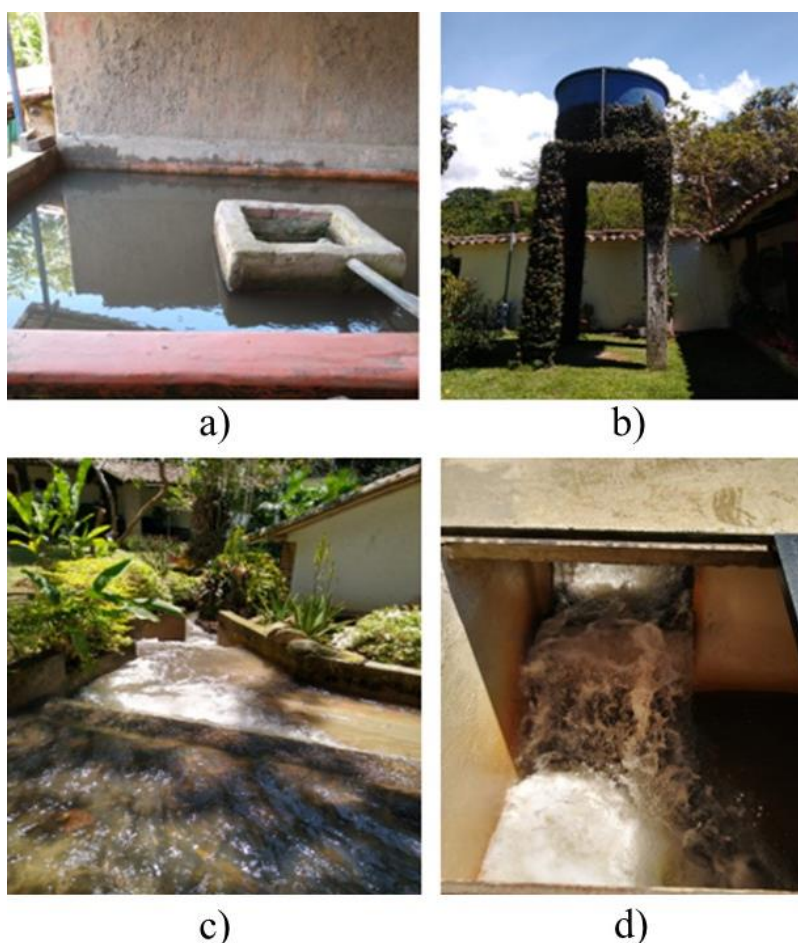


Figura 4. Áreas de almacenamientos y canales artificiales de la universidad.

Nota: *a) Pileta de almacenamiento. b) Tanque de almacenamiento. c) Canal artificial. d) Canal subterráneo.

4.1.2 Caracterización Físicoquímica y Microbiológica. En la tabla 10 se presentan los resultados de las características iniciales con las que el agua ingresa a la finca. Como se puede observar, en la muestra problema se evidencia valores altos de turbiedad y microorganismos patógenos los cuales se pueden asociar a actividades de agricultura, porcicultura e industriales desarrolladas aguas arriba de la captación. Según lo anterior, el agua no cumple con los criterios de calidad admisibles para uso doméstico, agrícola y recreativo (tabla 11), por lo que es necesario realizarle un proceso de tratamiento.

Tabla 10. *Condiciones fisicoquímicas y microbiológicas del agua cruda*

Parámetro	Método	Valor	Unidades
Temperatura	Electrométrico	23,2	°C
pH	Electrométrico	7,45	-
Conductividad	Electrométrico	138,5	μS/cm
Turbidez	Nefelométrico	26,1	UNT
Coliformes totales	SM. 9221 B	5400	NMP/100mL
Coliformes termotolerantes	SM. 9221 E	700	NMP/100mL
Escherichia coli	SM 9221 B, F	210	NMP/100mL

Tabla 11. *Comparación de los valores de la muestra inicial con la normativa ambiental*

Parámetros	Muestra Inicial	Criterios de calidad admisibles según el Decreto 1594 de 1984		
		Uso doméstico	Uso agrícola	Uso recreativo
Turbiedad (UNT)	26,1	-	-	-
pH	7,45	5.0 - 9.0*	4.5 - 9.0	5.0 - 9.0
Coliformes totales (NMP/100mL)	5400	20000*	<5000	1000
Coliformes fecales (NMP/100mL)	210	2000*	<1000	200

Nota: * Los criterios de calidad admisibles para uso doméstico son valores que para su potabilización requieren solamente un tratamiento convencional.

Es importante mencionar que en el tanque el agua almacenada también se puede ver alterada por la acumulación de sedimentos en el fondo, lo que, a su vez, permite el crecimiento de microorganismos patógenos si no se realiza una limpieza adecuada del mismo.

Por otra parte, como el muestreo se hizo en temporada de lluvias, el valor de la turbiedad fue elevado (26,1 UNT), por lo que, es recomendable evaluar el prototipo en temporada seca para así poder comparar su porcentaje de rendimiento.

Así mismo, en la figura 5 se observa una leve coloración en la muestra de agua lo que puede indicar la presencia de sólidos disueltos.



Figura 5. Muestra inicial de agua cruda

4.2 Diseño y elaboración del sistema de filtración

El prototipo de filtración se dimensionó siguiendo una escala 1:5, teniendo en cuenta las recomendaciones de diseño del RAS 2017 y la Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas. En la figura 6 se puede observar el prototipo final con el soporte metálico. En el sistema se presentó una pérdida de agua en cada tanque, debido a la altura en que se realizaron los orificios para las conexiones hidráulicas, ya que, estos tuvieron que ser realizados a una distancia mínima de 2.5 cm desde el fondo de cada recipiente para evitar posibles fisuras.

El sistema puede operar con una capacidad de 5 L en un tiempo aproximado de 6 horas, asegurando así un proceso de filtración y desinfección completo con el caudal de salida establecido (15 mL/min) durante un tiempo de contacto de 30 minutos en el filtro de desinfección. Además, el prototipo trabajó con una tasa de filtración de $0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{min}$, para mantener un tiempo de permanencia adecuado en cada unidad.



Figura 6. Sistema de filtración a escala laboratorio

Ahora bien, como se mencionó en la metodología, cada unidad está compuesta por capas de diferentes espesores como se evidencia en la tabla 12. Estas incluyeron materiales como grava gruesa o triturado de 3/4", grava de 2 1/2" y grava fina de 2", utilizando la grava gruesa también como capa de soporte.

Tabla 12. *Profundidad del medio filtrante*

Filtro	Capa	Espesor de la capa (cm)
FGDi	Soporte superior	3
	Grava fina	4
	Grava	5
	Grava gruesa	3
	Soporte inferior	3
FG	Soporte superior	2
	Grava	4
	Grava fina	5
	Soporte inferior	5
FLA	Soporte superior	1
	Arena	17
	Grava fina	2
	Soporte inferior	5
FC	Soporte superior	1
	Cascarilla	1
	Carbón activado	5
	Soporte inferior	4

Nota: *Se utilizaron diferentes diámetros de grava, grava fina 6 - 14 mm, grava 16 – 20 mm, grava gruesa 20 -24 mm, arena 2 mm, cascarilla de café 5 mm.

Con respecto a la unidad de desinfección (FC), como la cascarilla no fue sometida a lavados más profundos para eliminar taninos (compuestos causantes de generar color en el agua filtrada), fue necesario incluir una capa de 5 cm de carbón activado después de esta, ya que el carbón es ampliamente conocido por sus propiedades para eliminar color, olor y sabor del agua. Sin embargo, se observó que el agua filtrada presentó una leve coloración amarilla atribuida a la cascarilla, por lo cual, en un estudio posterior se hace necesario aumentar el tamaño del filtro de desinfección e incrementar el tamaño de la capa de carbón para poder eliminar efectivamente la coloración del agua.

4.3 Síntesis de nanopartículas de plata en cascarilla de café aplicando el método químico y síntesis verde

La cascarilla de café es un residuo lignocelulósico producido en la agroindustria, que se puede aprovechar al máximo, ya que genera soluciones ambientales efectivas y rápidas. Por tal razón, se escogió esta biomasa como soporte para la impregnación de las nanopartículas.

La síntesis de nanopartículas se basa en tres pasos fundamentales: nucleación, crecimiento y estabilización (Ovalle et al, 2013). Cuando se sumerge la cascarilla de café en la solución de NaBH_4 se inicia la fase de nucleación, donde el agente reductor empieza a convertir los iones de plata, unidos electrostáticamente a la superficie de la cascarilla, en plata metálica. Los átomos de plata neutros comienzan a agregarse y la nanoestructura crece sobre la superficie hasta alcanzar un volumen estable (Ovalle et al, 2013). La cascarilla de café presenta una gran ventaja para la deposición de nanomateriales debido al alto contenido de celulosa en ella, pues este compuesto posee una carga parcial negativa que facilita la interacción electrostática con iones de metales de transición electropositivos como la plata. Dicha interacción ocurre cuando el material se sumerge en la solución del nitrato de plata, una vez depositados los iones Ag^+ sobre la superficie de la cascarilla se procede a realizar su reducción con NaBH_4 , es ahí donde inicia la formación de las AgNPs (Ovalle et al, 2013). En la figura 7a, se observa la cascarilla en su estado natural. Una vez realizada la síntesis se presenció un cambio de color en el material como se observa en la figura 7c, pasando de un tono café claro (figura 7a) a una coloración más oscura (figura 7c), lo que evidencia una posible deposición de las nanopartículas de plata sobre la cascarilla y la formación de agregados. Sin embargo, para poder determinar si hubo o no impregnación de la plata, así como su morfología es necesario realizar un análisis mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM).

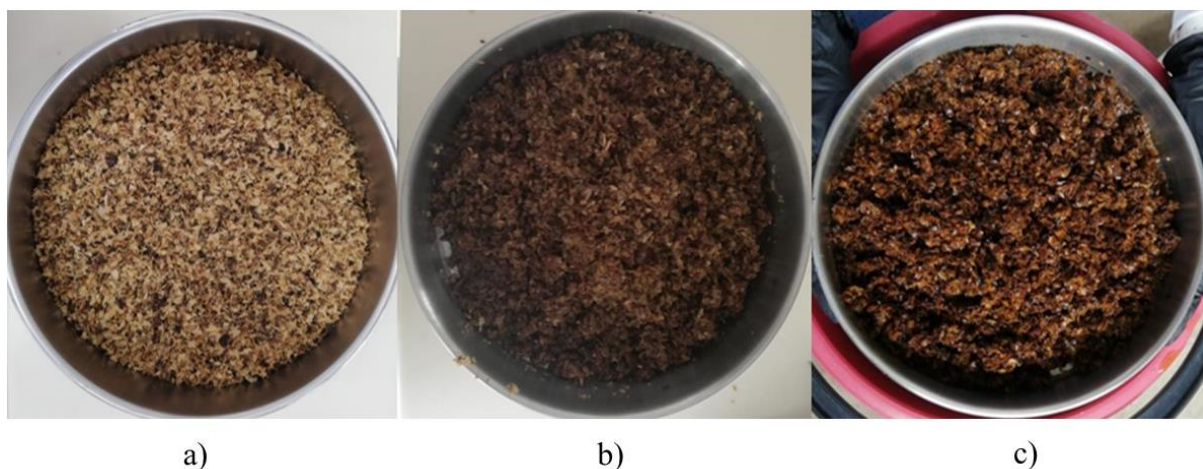


Figura 7. Síntesis de AgNPs en cascarilla de café aplicando el método químico

Nota: * a) Cascarilla sin modificación. b) Cascarilla con AgNO_3 . c) Cascarilla con NaBH_4 .

Para la síntesis verde, se reemplazó el NaBH_4 por un compuesto de origen biológico, como es el extracto acuoso de *camellia sinensis* (té verde), ya que, contiene gran cantidad de compuestos fenólicos y terpenoides, los cuales se caracterizan por tener propiedades reductoras. Por lo tanto, contribuyen al proceso de reducción de iones metálicos y a controlar el tamaño y estabilidad de las nanoestructuras. Sin embargo, es complejo definir cuál de los compuestos es el componente específico que lleva a cabo la formación de las nanopartículas de plata. En la figura 8, se puede observar que la cascarilla presentó un cambio de color al ser modificada con las nanopartículas de plata, lo que daría a entender que si hubo una impregnación de estas. Sin embargo, dicho cambio de color no fue tan intenso como en el método químico, lo que puede sugerir que las AgNPs que se generaron tienen un tamaño menor o no tienen agregados.

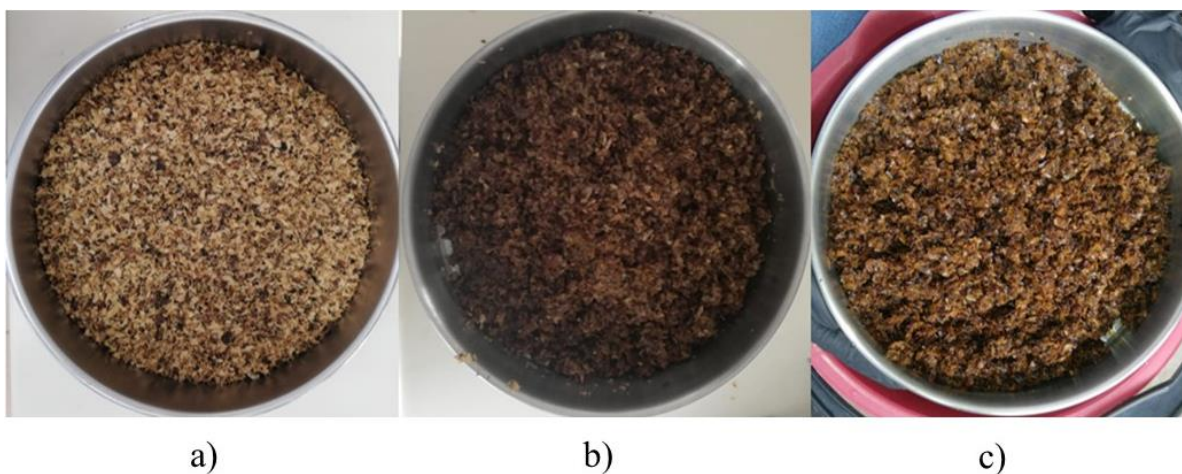


Figura 8. Síntesis de AgNPs en cascarilla de café aplicando método verde

Nota: * a) Cascarilla sin modificación. b) Cascarilla con AgNO₃. c) Cascarilla con té verde.

En la figura 9 se puede observar de forma más clara el cambio en la coloración de la cascarilla modificada con las diferentes síntesis a temperatura ambiente. Dicha variación es producto del agente reductor utilizado y de su concentración, ya que este, influye significativamente en el crecimiento, morfología y distribución de las nanopartículas.

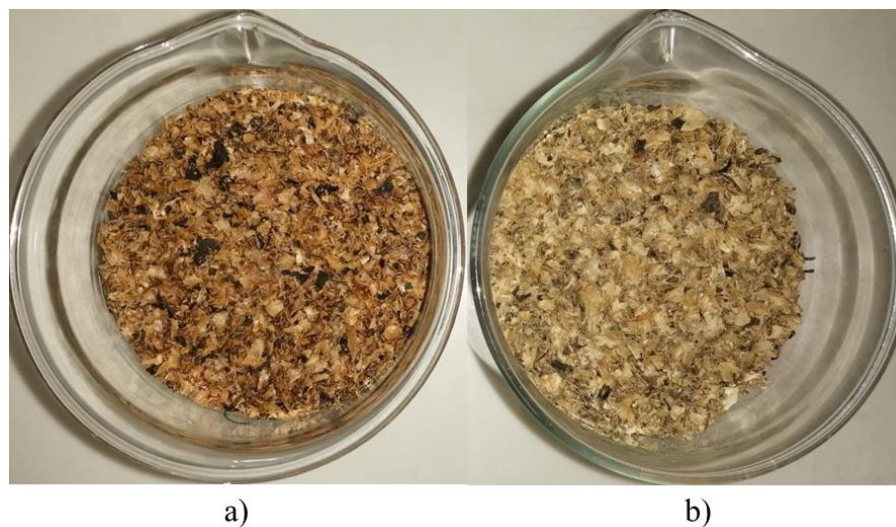


Figura 9. Cascarilla de café modificada con nanopartículas de plata

Nota: * a) Cascarilla sintetizada con NaBH₄. b) Cascarilla sintetizada con té verde.

4.4 Análisis de la eficiencia del sistema

Los FiME son sistemas reconocidos por su alta eficiencia en remoción de parámetros como turbiedad, sólidos y en algunos casos microorganismos patógenos, tal como los resultados obtenidos por Mushila C. et Al. (2016), quienes reportaron remociones del 98% para coliformes fecales, 96% coliformes totales, y también lograron cumplir con la normativa llegando a tener una turbiedad de 5 UNT. En la presente investigación se elaboró un filtro en múltiples etapas seguido de un filtro de desinfección con el fin de aumentar los porcentajes de remoción en contaminantes. En la figura 10 se presentan las muestras de agua filtradas por el tren de tratamiento, teniendo como muestra 1 (M1) el agua filtrada con la cascarilla de café sin modificar, la muestra 2 (M2) corresponde al agua filtrada con la cascarilla de café modificada con $\text{AgNO}_3 + \text{NaBH}_4$, y la muestra 3 (M3) representa el agua filtrada con $\text{AgNO}_3 + \text{té verde}$.

Los FiME, son sistemas reconocidos por remover turbiedad, sólidos, microorganismos patógenos, y en algunos casos, color cuando se añade una capa de carbón activado. Sin embargo, en la presente investigación las muestras presentaron una leve coloración amarilla, exceptuando la M3, en la cual, antes de hacer pasar la muestra se reemplazó la capa de carbón activado por una nueva, lo que aportó un color levemente oscuro al agua, incrementando a su vez la turbiedad (17,3 UNT) en comparación con las demás muestras. Lo anterior se debe a la presencia de partículas en suspensión generadas por el carbón activado ya que no se le realizaron los lavados suficientes. Con respecto a la muestra 1, se puede observar una remoción del 82% de turbiedad, atribuido a los numerosos lavados previos a los que fueron sometidos el sistema con la cascarilla y el carbón activado, valor similar a los resultados obtenidos por (Pereira E. et Al., 2013), quienes reportaron remociones del 85% de turbiedad con un sistema FiME que contenía carbón activado y mantas sintéticas no tejidas. No obstante, como se observa en la tabla 13 las muestras 2 y 3 presentaron

valores más elevados de turbiedad (12,2 UNT y 17,3 UNT respectivamente) a causa del intercambio del material filtrante en el filtro de desinfección, el cual debía realizarse rápidamente y por lo tanto no fue sometido a suficientes lavados para disminuir el exceso de color característico de la cascarilla de café.



Figura 10. Muestras de agua filtrada

Nota: *De izquierda a derecha M1, M2, M3. Donde, M1: Muestra filtrada con cascarilla. M2: Muestra filtrada con cascarilla + AgNPs (SQ). M3: Muestra filtrada con cascarilla + AgNPs (SV).

Con respecto al pH, en todas las muestras se obtuvo un valor similar de pH neutro, lo que indica que la cascarilla con y sin modificar no generó cambios aparentes en dicho parámetro.

Tabla 13. Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua cruda y filtrada

Muestras	T (°C)	pH	CE (μ S/cm)	TB (UNT)	CT (NMP/100mL)	Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	E. Coli (NMP/100mL)
Agua cruda	23,2	7,45	138,5	26,1	5400	700	210
M1	25,3	7,22	142,1	4,76	3500	2	2
M2	26,5	7,59	120,1	12,2	26	4	1,8
M3	26,6	7,36	103,6	17,3	4300	4	2

Nota: * M1: Muestra filtrada con cascarilla. M2: Muestra filtrada con cascarilla + AgNPs (SQ). M3: Muestra filtrada con cascarilla + AgNPs (SV).

En general, el sistema de filtración presentó una tasa alta de remoción en microorganismos patógenos, cumpliendo así con los resultados esperados (remoción >95%), pues como se observa en la tabla 14, se lograron remociones superiores al 99%, especialmente en la muestra 2 cuya eliminación fue del 99,52% y 99,14% para coliformes totales y coliformes fecales respectivamente. Según lo anterior, se puede deducir que la muestra que presentó mayor efectividad fue aquella que se filtró con la cascarilla de café modificada con NaBH_4 , lo que significa que a pesar de que con la muestra 3 se obtuvieron buenos resultados, la síntesis química sigue siendo la mejor opción en cuanto a eficiencia de remoción se trata, probablemente porque se logró sintetizar nanopartículas con menor tamaño, lo cual pudo haber incrementado su efectividad, sin embargo para verificar esta información es imprescindible realizar la caracterización elemental y morfológica del material por microscopia electrónica de barrido (SEM) y por microscopia electrónica de transmisión (TEM). Cabe mencionar que, en el presente estudio se utilizó una concentración de 12g de té verde/1000mL de agua, por lo que es importante en otro estudio trabajar con una concentración mayor, para evaluar si la eficiencia de remoción en la cascarilla modificada con AgNPs + té verde es proporcional a la concentración de este. Sin embargo, la muestra 1 correspondiente a la cascarilla sin modificaciones también presentó una eficiencia alta en remoción de microorganismos como *E. coli* y coliformes termotolerantes (99,05% y 99,71% respectivamente), la cual se puede asociar a la eficiencia del FiME. Estos valores son superiores a los porcentajes de remoción de 98% en coliformes fecales y 96% en coliformes totales obtenidos por (Mushila C. et Al., 2016) en la optimización de las unidades de un sistema de filtración en múltiples etapas. Dicha eliminación es producto del FLA, en el que se desarrolla una biopelícula compuesta por microorganismos como bacterias, protozoarios, algas, entre otros, que son los encargados de remover materia orgánica y microorganismos patógenos (Canépa de Vargas, s.f.).

El porcentaje de eliminación de microorganismos depende de la maduración de la película biológica en el lecho filtrante, siendo 0 cuando la biopelícula no ha madurado y de hasta 2 a 4 logaritmos cuando la biopelícula se desarrolla (Canépa de Vargas, s.f.).

Tabla 14. *Eficiencia de remoción en parámetros microbiológicos*

Muestra	CT (%)	Coliformes termotolerantes (%)	E.Coli (%)
M1	35,19	99,71	99,05
M2	99,52	99,43	99,14
M3	20,37	99,43	99,05

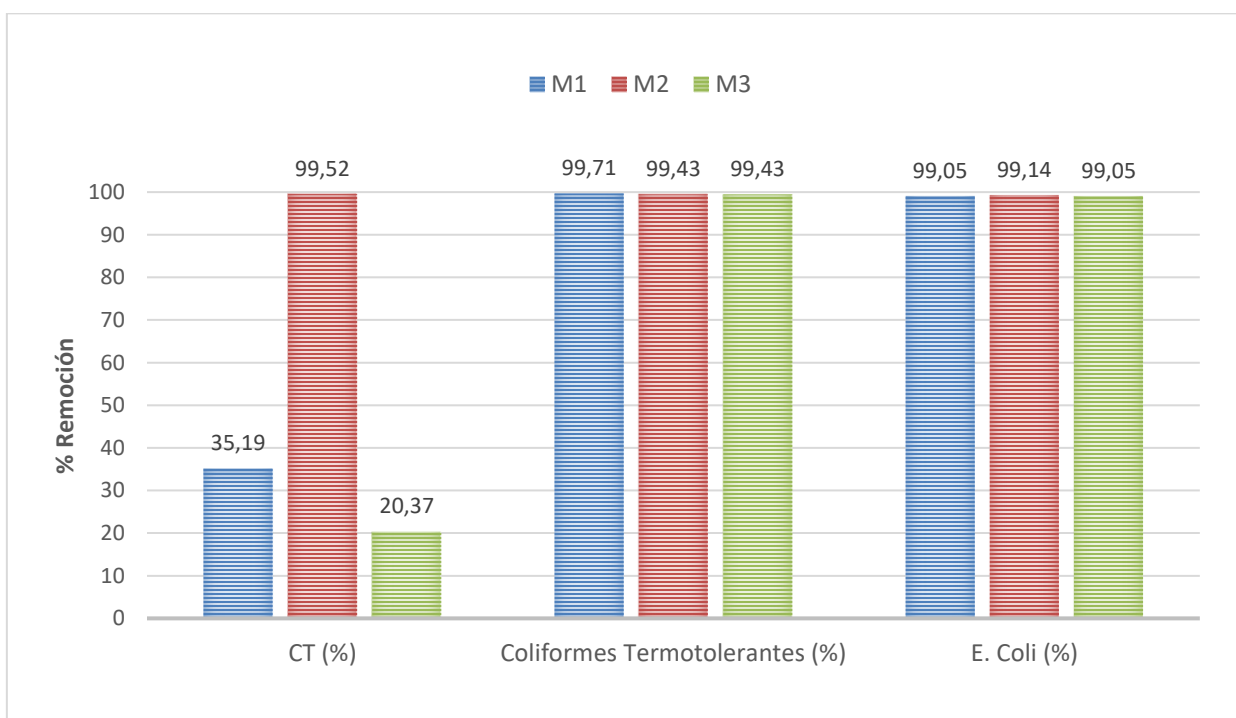


Figura 11. Porcentaje de remoción de parámetros microbiológicos

Siguiendo con lo anterior, los coliformes totales son microorganismos que pueden estar presentes en el suelo o en agua dulce, también son indicadores de contaminación en el agua, pues

a menudo están relacionados con heces fecales. De los tres sistemas evaluados, la reducción química fue la única en la que se lograron remociones mayores del 90% para este parámetro (99,52%), lo que puede constatar la deposición de las AgNPs sobre la cascarilla de café. Sin embargo, no se puede decir lo mismo de la cascarilla modificada con té verde, pues su porcentaje de remoción fue el más bajo, comparado con las otras dos muestras (figura 11).

Por otra parte, la *Escherichia coli* indica contaminación fecal en el agua y es el principal causante de enfermedades de origen hídrico en zonas que no cuentan con acceso a agua potable (Sánchez, 2018). En el sistema de filtración se lograron remociones del 99% para coliformes fecales (figura 11), siendo la mayor remoción con el material modificado con el NaBH_4 , lo que representa una disminución significativa de microorganismos, aunque, dicha disminución no se puede atribuir totalmente a las nanopartículas de plata, puesto que, la muestra 1 (cascarilla sin modificar) también presentó valores altos de eliminación (99,05%).

De acuerdo con lo anterior, en general el sistema demostró tener una alta eficiencia para la eliminación de microorganismos con un tiempo de contacto de 30 minutos. No obstante, la mayoría de los estudios concuerdan que a mayor tiempo de contacto y cantidad del bionanocomposito se logran mayores remociones (Asadi & Moeinpour, 2019). Por ende, es necesario en una investigación posterior aumentar el tiempo de contacto y la cantidad del material filtrante con el fin de obtener remociones del 100%.

Ahora bien, según la resolución 2115 de 2007, el agua filtrada no cumplió con ningún criterio allí establecido ya que, el valor máximo aceptable para características microbiológicas es de 0 UFC/100 cm^3 , y para turbiedad es de 2 UNT, por lo que no puede ser destinada para el consumo humano. Por tal motivo, fue necesario determinar un uso del agua que cumpliera con la normativa ambiental vigente (Decreto 1594 de 1984 y Decreto 3930 de 2010). Según esto, es posible destinar

el agua filtrada para actividades de uso agrícola, ya que cumple con los criterios admisibles en microorganismos patógenos, menores a 5000 NMP/100mL y 1000 NMP/100mL para coliformes totales y fecales respectivamente y para fines recreativos cumpliendo con los valores admisibles de coliformes fecales y totales de 200NMP/100mL y 1000NMP/100mL respectivamente (Apéndice A). Sin embargo, es importante realizar estudios donde se evalúen los otros parámetros establecidos en la normativa para los usos anteriormente mencionados.

Por esta razón, la búsqueda de soluciones efectivas, económicas y sustentables es cada vez más frecuente a nivel mundial, ya que, generan ahorros tanto para los gobiernos como para la población en general. En Colombia, son muy frecuentes las zonas rurales que no cuentan con acceso a servicio de acueducto y alcantarillado, por lo tanto, el desarrollo de proyectos de investigación como el presente pueden constituirse como una buena alternativa para la problemática mencionada. De igual forma, aunque la síntesis realizada con NaBH_4 fue la más eficiente, la cascarilla de café sintetizada por el método de química verde también puede ser considerada como una alternativa eficiente y económica para eliminar microorganismos patógenos del agua.

5. Conclusiones

El agua captada en la Finca El Limonal no cumple con las condiciones adecuadas para los usos a los que se está destinando, presentando valores de turbiedad de 26,1 UNT y coliformes totales y fecales de 5400NPM/100mL y 210NPM/100mL respectivamente, lo que, a su vez, puede constituirse como un riesgo sanitario para la comunidad tomasina.

Según el Decreto 1594 de 1984 se logró establecer que el agua cruda captada en la Finca El Limonal, tratada con el prototipo implementado en este estudio cumple con los criterios admisibles para la destinación del recurso en actividades agrícolas y recreativas.

La cascarilla de café impregnada de AgNPs con NaBH_4 y té verde se puede considerar una alternativa eficiente en la aplicación de filtros convencionales para zonas con problemáticas de acceso a agua potable, ya que presentaron una eficiencia en remoción de *E. Coli* y coliformes termotolerantes superior al 95% (figura 11). Si bien el método de química verde para la síntesis de nanopartículas de plata, no fue el más eficiente, es una alternativa económica y eficaz para el tratamiento de agua cruda en un sistema de filtración convencional, así como la cascarilla de café.

Los coliformes totales fueron los únicos que presentaron porcentajes bajos de eliminación con el uso de la muestra 1 y la muestra 3, exceptuando la muestra 2 (AgNPs + NaBH_4) que removió el 99,52%, por lo cual, se puede concluir que la cascarilla de café modificada mediante la síntesis química fue el método más efectivo para remover microorganismos patógenos.

La diferencia significativa en la variación de turbiedad entre todas las muestras se debe a los lavados del material, así como al cambio en la capa de carbón que se realizó antes de hacer pasar la muestra 3. Por eso, es importante lavar numerosas veces el material, pues se evidenció que sólo en la muestra 1 se logró remover hasta el 81,7% de la turbiedad, teniendo en cuenta que, en esta, el sistema completo ya había sido sometido a diversos lavados previos.

De la síntesis de nanopartículas de plata, se podría deducir que se apreció un cambio de color amarillo a café en la cascarilla, que probablemente se debe a una deposición de AgNPs, especialmente en el material sintetizado por reducción química (M2), el cual logró la mayor remoción en coliformes totales (99,52%) en comparación con las muestras 1 y 3 (35,19 y 20,37% respectivamente).

6. Recomendaciones

De acuerdo con la presente investigación, se recomienda antes de realizar el montaje del sistema de filtración, lavar repetidas veces con agua potable el material filtrante para eliminar cualquier tipo de impurezas contenidas en este y así lograr reducir el valor de la turbiedad en el sistema. De igual forma, la cascarilla debe ser sometida a procesos de lavado especiales para evitar la filtración de su color característico al agua. Además, se recomienda realizar una caracterización inicial de la cascarilla para conocer su contenido en compuestos de interés (celulosa) para la síntesis. Adicional a esto, se recomienda que en el sistema los orificios de salida se ubiquen en la tapa inferior de cada tanque para evitar zonas muertas.

Con el tiempo de contacto de 30 minutos se logró obtener eficiencias hasta del 99% en el prototipo, sin embargo, para obtener una eficiencia total del 100%, se recomienda aumentar el tiempo de contacto hasta 2 horas, así como la cantidad del material filtrante impregnado con las nanopartículas.

Como en la salida del FiME no se obtuvieron resultados acerca de los coliformes, en futuros estudios se debe realizar el análisis de este parámetro para comparar la eficiencia del FiME con el filtro de desinfección.

En cuanto a las nanopartículas, para determinar si realmente hubo impregnación sobre la cascarilla de café, así como su morfología y tamaño, se recomienda realizar su caracterización por medio de la microscopia electrónica de barrido (SEM).

También se recomienda utilizar otros compuestos de origen natural para la síntesis verde, como extracto de frutas u otras plantas que puedan ser fácilmente asequibles en zonas rurales.

Finalmente, a pesar de obtener buenos resultados en cuanto a remoción de coliformes, se recomienda evaluar el sistema de filtración con otro tipo de contaminantes, y así poder determinar más usos posibles para el recurso hídrico.

Referencias Bibliográficas

- Asadi, S., & Moeinpour, F., (2019). Inactivation of *Escherichia coli* in water by silver-coated $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ magnetic nanocomposite: a Box–Behnken design optimization. *Applied Water Science*, 9(23).
- Burbano Patiño, A. (2018). *Síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas del tipo core-shell $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Ag}$ soportadas sobre lignina y cascarilla de café* (tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia.
- Caminati, A., & Caqui, R. (2013). *Análisis y diseño de sistemas de tratamiento de agua para consumo humano y su distribución en la universidad de Piura* (tesis de pregrado). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Campos, A., Narciso, D., Cortijo, J., Nazario, R., Rengifo, R., & Asmat, E. (2019). Síntesis verde y caracterización de nanopartículas de plata, mediante la acción reductora del extracto acuoso de arándano (*Vaccinium corymbosum*). *17th LACCEI International Multi- Conference for Engineering, Education, and Technology*. Conferencia llevada a cabo en Montego Bay, Jamaica.
- Cánepa de Vargas, L. (s.f). *Filtración lenta como proceso de desinfección*. Recuperado el 02 de diciembre de 2020, de El Agua Potable: <http://www.elaguapotable.com/FILTRACI%C3%93N%20LENTA%20COMO%20PROCESO%20DE%20DESINFECCI%C3%93N.pdf>
- Cardoso, P. (2016). Nanopartículas de plata: obtención, utilización como antimicrobiano e impacto en el área de la salud. *Hospital Niños*, 58(260), 19-28.

Colombia, Decreto 3930 de 2010, Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. 25 de octubre de 2010.

Cooperación Suiza en América Central. (2014). *La filtración en múltiples etapas en Nicaragua y Honduras (FiME)*. Recuperado el 23 de junio de 2020, de Aguasan Nicaragua: <https://www.aguasannicaragua.com/wp-content/uploads/2018/05/La-Filtracion-en-multiples-etapas-en-Nicaragua-y-HondurasFIME.pdf>

Dankovich, T. & Derek, G. (2011). Bactericidal Paper Impregnated with Silver Nanoparticles for Point-of-Use Water Treatment. *Environmental Science & Technology*, 45(5), 1992-1998.

Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de mayo 2015.

Decreto 1594 de 1984, Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI-Parte III-Libro II y el Título III de la Parte III-Libro I-del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. 26 de junio de 1984.

Dieti Natura. (s.f). Té verde. Recuperado el día 11 de agosto de 2020, de <https://www.dieti-natura.es/plantas-y-activos/te-verde.html#>

Evangelista, S., Viccione, G., & Siani, O. (2019). A new cost effective, long life and low resistance filter cartridge for wáter treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 27, 1-14.

- Feijoo Carrillo, C.P. (2018). *Reducción de microorganismos del agua en la zona rural de la Esperanza Alta-Huaral utilizando nanopartículas de plata sintetizadas con Rosmarinus officinalis aplicando química verde* (tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
- Gómez, L. & Moreno, M. (2017). *Diseño a escala real de un sistema de filtración en múltiples etapas (FiME): Estrategia para la potabilización del agua de la comunidad rural de Guamal en Supía, Caldas* (tesis de pregrado). Universidad católica de Manizales, Manizales, Colombia.
- Gómez, M., Danglot, C., & Vega, L. (2010). Disponibilidad de agua para la salud y la vida. *Mexicana de pediatría*, 77(6), 260-270.
- Guevara Bernal, D. (2020). *Implementación de cascarilla de café en la bioadsorción de metales pesados y su actividad antimicrobiana* (tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia.
- Gutiérrez, A. (2014). *Producción y caracterización de un filtro para purificar agua a partir de ceniza de cascarilla de arroz impregnada con nanopartículas de plata* (tesis de maestría). Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Hernández Díaz, M.P. (2013). *Síntesis de nanopartículas de plata biológicamente asistida con Opuntia SP. y su incorporación en membranas poliméricas nanofibrosas* (tesis de maestría). Centro de investigación en química aplicada, Saltillo, México.
- IDEAM. (2002). Guía para monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Recuperado el 30 de marzo de 2020, de Corporación autónoma regional de la Frontera Nororiental:

https://corponor.gov.co/corponor/sigescor2010/TRAMITESYSERVICIOS/Guia_monitor_eo_IDEAM.pdf

- Karumuri, A., Oswal, P., Hostetler, A., & Mukhopadhyay, M. (2013). Silver nanoparticles attached to porous carbon substrates: robust materials for chemical-free water disinfection. *Materials Letters*, 109, 83-87.
- López, I., Vilchis, N., Sánchez, M., Avalos, B. (2013). Obtención y caracterización de nanopartículas de plata soportadas en fibra de algodón. *Scielo*, 26, 73-78.
- Manals, E., Salas, D., & Penedo, M. (2018). Caracterización de la biomasa vegetal "cascarilla de café". *Tecnología Química*, 38(1),169-181
- Montoya, N., Montenegro, Y., Porras, A., Dos, G., & Isaac de Lima, R. (2014). Estudio de un sistema piloto de filtración de agua recubierto con nanopartículas de plata. *Semilleros*, 1(1), 105-116.
- Mushila, C., Ochieng, G., Otieno, F., Shitote, S., & C, S. (2016). Hydraulic design to optimize the treatment capacity of Multi-Stage Filtration units. *Physics and Chemistry of the Earth*, 92, 85-91.
- Noriega, M., Quintero, C., Guajardo, J., Morales, J., & Compeán, M. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 87-100.
- Ojeda, L. (2012). *Determinación de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del Tropaeolum Tuberosum, en el tratamiento del agua cruda de la puengasí de la EPMAPS* (tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Colombia.

OMS. (2013). *El abastecimiento de agua, el saneamiento y el desarrollo de la higiene*.

Recuperado el 25 de marzo de 2020, de Organización Mundial de la Salud:

https://www.who.int/water_sanitation_health/hygiene/es/

OMS. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que

incorpora la primera adenda. Recuperado el 25 de marzo de 2020, de Organización

Mundial de la Salud:

<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1>

OPS. (2005). Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas.

Recuperado el 20 de marzo de 2020, de Organización Panamericana de la Salud:

<http://www.elaguapotable.com/Guia%20dise%C3%B1o%20filtraci%C3%B3n%20n%20multiples%20etapas.pdf>

Ovalle, S., Blanco, C., & Combariza, M. (2013). Síntesis *in situ* de nanopartículas de plata sobre

fibras de fique. *Revista Colombiana de Química*, 42(1), 30-37.

Pereira, E., Rosa, L., Medri, R., & Sánchez, I. (2013). Evaluación del desempeño de filtración en

múltiples etapas usando carbón activado granular y mantas sintéticas no tejidas.

Interciencia, 38(10), 726-732.

Pilaquinga, F., Pazmiño, K., Robalino, A., Jara, E., López, F., Meneses, L., Vizuite, K., &

Debut, A. (2019). Síntesis verde de nanopartículas de plata usando el extracto acuoso

de las hojas de ajo (*Allium sativum*). *InfoANALÍTICA*, 7(2), 41-55.

PNUD. (2018). *Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento*. Recuperado el 25 de marzo de 2020,

del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo:

[https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-](https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html)

[clean-water-and-sanitation.html](https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html)

- Quang, D., Sarawade, P., Jeon, S., Kim, S., Kim, J., Chai, Y., & Kim, H. (2013). Effective water disinfection using silver nanoparticle containing silica beads. *Applied Surface Science*, 266, 280-287.
- Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. 22 de junio de 2007
- Resolución 330 de 2017. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las Resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. 08 de junio de 2017.
- Romero, M., & Mejillón, M. (2018). *Elaboración de un filtro de barro compuesto de arcilla roja, óxido de grafeno y nanopartículas de plata para el tratamiento de aguas de Río Chimbo* (tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Rotoplas. (2018). *Agua Cruda*. Recuperado el 23 de marzo de 2020, de Rotoplas: <https://rotoplas.com.mx/agua-cruda/>
- Sánchez Álvarez, K.L. (2018). *Eliminación de Escherichia coli en sistemas de captación de agua estancada a partir de geomembranas impregnadas con nanopartículas metálicas* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Sánchez, L., Sánchez, A., Galvis, G., & Latorre, J. (2007). *Filtración en múltiples etapas*. Recuperado el 23 de junio de 2020, del IRC: <https://es.ircwash.org/resources/filtraci%C3%B3n-en-m%C3%BAltiples-etapas>

- Sánchez Moreno, M. (2017). *Nanopartículas de plata: preparación, caracterización y propiedades con aplicación en inocuidad de los alimentos* (tesis de maestría).
- Semana Sostenible. (20 de Marzo de 2019). *Cerca de 800.000 personas mueren al año en el mundo por la falta de acceso a agua potable*. Recuperado el 20 de marzo de 2020, de Semana Sostenible: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/cerca-de-800000-personas-mueren-al-ano-en-el-mundo-por-la-falta-de-acceso-a-agua-potable/43385>
- Tamilarasi, P. & Meena, P. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles (Ag NPs) using *Gomphrena globosa* (Globe amaranth) leaf extract and their characterization. *Materials Today: Proceedings*, 1-8.
- Tarazona, R., & Peña, D. (2011). *Estudio de la remoción de coliformes en aguas naturales utilizando un filtro tipo cartucho empacado con nanocompositos de fibras de fique con nanopartículas de plata* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga , Colombia.
- Torres, C., García, C., García, J., García, M. & Pacheco, R. (2016). Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración. *Salud Pública*. 19, 453-459.
- Vargas, Z., Granados, J. & Hernández, O. (2013). Síntesis de nanopartículas de plata como propuesta pedagógica para la enseñanza de la nanotecnología. *Revista de Simulación y laboratorio*. 4 (11), 43-52.
- Villareal Veloz, M. (2018). *Evaluación de materiales locales en la fabricación de filtros para el tratamiento de agua potable* (tesis de pregrado). Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Cuba.

Apéndices

Apéndice A. Criterios de calidad para destinación del recurso según el decreto 1594 de 1984

Tabla 15. *Criterios de calidad admisibles para consumo humano y doméstico*

Referencia	Expresados como	Valor
Amoníaco	N	1
Arsénico	As	0.05
Bario	Ba	1
Cadmio	Cd	0.01
Cianuro	CN-	0.2
Cinc	Zn	15
Cloruros	Cl-	250
Cobre	Cu	1
Color	Color real	75 unidades, escala Platino-Cobalto
Compuestos Fenólicos	Fenol	0.002
Cromo	Cr ⁺⁶	0.05
Difenil Policlorados	Concentración de agente activo	No detectable
Mercurio	Hg	0.002
Nitratos	N	10
Nitritos	N	1
pH	Unidades	5-9 unidades
Plata	Ag	0.05
Plomo	Pb	0.05
Selenio	Se	0.01
Sulfatos	SO ₄	400
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.5
Coliformes totales	NMP	20.000 microorganismos/100 ml
Coliformes fecales	NMP	2.000 microorganismos/100ml

*Los valores se encuentran expresados en miligramos por litro. *

Tabla 16. *Criterios de calidad admisibles para uso agrícola*

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5
Arsénico	As	0.1
Berilio	Be	0.1
Cadmio	Cd	0.01
Cinc	Zn	2
Cobalto	Co	0.05
Cobre	Cu	0.2
Cromo	Cr ⁺⁶	0.1
Flúor	F	1
Hierro	Fe	5
Litio	Li	2.5
Manganeso	Mn	0.2
Molibdeno	Mo	0.01
Níquel	Ni	0.2
pH	Unidades	4.5-9 unidades
Plomo	Pb	5
Selenio	Se	0.02
Vanadio	V	0.1

*Los valores se encuentran expresados en miligramos por litro. *

Tabla 17. *Criterios de calidad admisibles para uso pecuario*

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5
Arsénico	As	0.2
Boro	B	5
Cadmio	Cd	0.05
Cinc	Zn	25
Cobre	Cu	0.5
Cromo	Cr ⁺⁶	1
Mercurio	Hg	0.01
Nitratos+Nitritos	N	100
Nitrito	N	10
Plomo	Pb	0.1
Contenido de sales	Peso total	3000

Tabla 18. *Criterios de calidad admisibles para uso recreativo mediante contacto primario*

Referencia	Expresado como	Valor
Coliformes fecales	NMP	200 microorganismos/100 mL
Coliformes totales	NMP	1000 microorganismos/100 mL
Compuestos fenólicos	Fenol	0.002
Oxígeno disuelto		70% concentración de saturación
pH	Unidades	5.0 – 9.0 unidades
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.5

Apéndice B. Valores máximos aceptables de características físicas, químicas y microbiológicas para consumo humano según la resolución 2115 de 2007

Tabla 19. *Valores máximos aceptables de características físicas para consumo humano*

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Tabla 20. *Valores máximos aceptables de características químicas para consumo humano*

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0.02
Arsénico	As	0.01
Bario	Ba	0.7
Cadmio	Cd	0.003
Cianuro libre y dissociable	CN	0.05
Cobre	Cu	1
Cromo total	Cr	0.05
Mercurio	Hg	0.001
Níquel	Ni	0.02
Plomo	Pb	0.01
Selenio	Se	0.01
Trihalometanos Totales	THMs	0.2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0.01

Tabla 21. *Valores máximos aceptables de características microbiológicas para consumo humano*

Técnicas utilizadas	Coliformes Totales	Escherichia coli
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm ³	0 UFC/100 cm ³
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm ³	< de 1 microorganismo en 100 cm ³
Sustrato Definido	0 microorganismo en 100 cm ³	0 microorganismo en 100 cm ³
Presencia-Ausencia	Ausencia en 100 cm ³	Ausencia en 100 cm ³

Apéndice C. Características de filtración convencional, FiME y filtración avanzada, según la resolución 330 del 2017

Tabla 22. *Características de filtración convencional*

Parámetro	Filtración lenta con lecho simple	Filtración rápida con lecho simple	Filtración rápida con lecho mixto
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	7-14	< 120	180-350
Profundidad del medio (m)	0.8-1	0.6-0.9	Antracita: 0.4-0.6 Arena: 0.15-0.3

Tabla 23. *Rangos de tasa de filtración lenta en múltiples etapas (FiME)*

Parámetro	Filtración lenta en arena	Filtro grueso dinámico	Filtro grueso ascendente
Tasa de filtración (m ³ /m ² /d)	7-14	48-72	7.2-14.4
Profundidad del medio (m)	0.8-1	0.6 (0.2 cada capa)	0.4-0.9

Tabla 24. *Características de las membranas de filtración avanzada*

Tipo de proceso	Tipo de sustancia que se rechaza	Tamaño de poro
Microfiltración	Material coloidal	0.1-0.2 μm
Ultrafiltración	Macromoléculas	0.01-0.04 μm
Nanofiltración	Azúcares/sales bivalentes	> 0.001 μm
Electrodiálisis	Azúcares/sales bivalentes	> 0.001 μm
Ósmosis inversa	Sales monovalentes	5-20 Ångström

Apéndice D. Resultado de caracterización de muestras por el Laboratorio SIAMA



siama
NIT. 804.016.152-8

REPORTE DE RESULTADOS N° MB-190127

Fecha de emisión: 26 de noviembre de 2020 Solicitante: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS Dirección: CARRERA 18 No. 9 – 27. Muestra: MUESTRA 3-USTA Fecha de muestreo: // Fecha de recepción: 19 de noviembre de 2020 Envase o empaque: vidrio Tipo de muestreo: puntual Condiciones de recepción la muestra: Refrigerada Observaciones: //		Código de la muestra. 190127 Matriz: Superficial Responsable de muestreo: solicitante Procedimiento de muestreo: solicitante Tamaño de la muestra: 500 mL Plan de muestreo: // Lote://
---	--	---

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Fecha de análisis	VARIABLE	MÉTODO	RESULTADOS	UNIDADES
19-11-2020 23-11-2020	*COLIFORMES TOTALES	SM. 9221 B	4300	NMP / 100 mL
19-11-2020 22-11-2020	*COLIFORMES TERMOTOLERANTES	SM. 9221 E	4,0	NMP / 100 mL
19-11-2020 22-11-2020	* <i>Escherichia coli</i>	SM. 9221 B, F	2,0	NMP / 100 mL

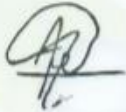
SM: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA. Edition 23th - 2017.

*** Variables realizadas en SIAMA. Acreditadas por IDEAM Resolución 1277 de 2019 extensión Resolución 0150 de 2020.**

Nota: La muestra a la que se refieren los datos de este reporte, ha sido proporcionada por el SOLICITANTE, por lo tanto, SIAMA, no es responsable del origen o fuente de donde se ha extraído dicha muestra. En consecuencia, los datos que figuran en el informe no constituyen una garantía de la representatividad de la(s) muestra(s) y por tanto se refiere(n) única y exclusivamente a dicha(s) muestra(s).

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

Este reporte de resultados es válido únicamente si tiene sello seco.



Elaboró: ANGÉLICA MARIA JAIMES MORENO
COORDINADORA MICROBIOLOGÍA
MICROBIÓLOGA. REG. FOLIO 82333-322



Revisó: BRAYAN VILLAMIZAR PÉREZ
DIRECTOR MICROBIOLOGÍA
MICROBIÓLOGO. REG. FOLIO. 799 13-L

FIN DEL REPORTE DE RESULTADOS.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados con el máximo rigor de la ley.

Código: R – 051	Versión: 0.4	Fecha: 10/02/2020	Página: 1 de 1
------------------------	---------------------	--------------------------	-----------------------

Figura 12. Reporte de resultados microbiológicos muestra filtrada con cascarilla + AgNPs (SV)



siama
NIT. 804.016.152-8

REPORTE DE RESULTADOS N° MB-190128

Fecha de emisión: 26 de noviembre de 2020 Solicitante: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS Dirección: CARRERA 18 No. 9 – 27. Muestra: MUESTRA 4-USTA Fecha de muestreo: // Fecha de recepción: 19 de noviembre de 2020 Envase o empaque: vidrio Tipo de muestreo: puntual Condiciones de recepción la muestra: Refrigerada Observaciones: //	Código de la muestra: 190128 Matriz: Superficial Responsable de muestreo: solicitante Procedimiento de muestreo: solicitante Tamaño de la muestra: 500 mL Plan de muestreo: // Lote: //
--	---

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Fecha de análisis	VARIABLE	MÉTODO	RESULTADOS	UNIDADES
19-11-2020 23-11-2020	*COLIFORMES TOTALES	SM. 9221 B	5400	NMP / 100 mL
19-11-2020 22-11-2020	*COLIFORMES TERMOTOLERANTES	SM. 9221 E	700	NMP / 100 mL
19-11-2020 22-11-2020	* <i>Escherichia coli</i>	SM 9221 B, F	210	NMP / 100 mL

SM: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. AWWA, WEF, APHA. Edición 22th - 2017.

*** Variables realizadas en SIAMA. Acreditadas por IDEAM Resolución 1277 de 2019 extensión Resolución 0150 de 2020.**

Nota: La muestra a la que se refieren los datos de este reporte, ha sido proporcionada por el SOLICITANTE, por lo tanto, SIAMA, no es responsable del origen o fuente de donde se ha extraído dicha muestra. En consecuencia, los datos que figuran en el informe no constituyen una garantía de la representatividad de la(s) muestra(s) y por tanto se refiere(n) única y exclusivamente a dicha(s) muestra(s).

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

Este reporte de resultados es válido únicamente si tiene sello seco.



Elaboró: ANGÉLICA MARIA JAIMES MORENO
 COORDINADORA MICROBIOLOGÍA
 MICROBIÓLOGA. REG. FOLIO 82333-322



Revisó: BRAYAN VILLAMIZAR PÉREZ
 DIRECTOR MICROBIOLOGÍA
 MICROBIÓLOGO. REG. FOLIO. 799 13-L

FIN DEL REPORTE DE RESULTADOS.

Cualquier modificación no autorizada, frente a falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados con el máximo rigor de la ley.

Código: R – 051	Versión: 0.4	Fecha: 10/02/2020	Página: 1 de 1
------------------------	---------------------	--------------------------	-----------------------

Figura 13. Reporte de resultados microbiológicos del agua cruda



SIAMA
NIT. 804.016.152-8

REPORTE DE RESULTADOS N° MB-190126

Fecha de emisión: 26 de noviembre de 2020 Solicitante: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS Dirección: CARRERA 18 No. 9 – 27. Muestra: MUESTRA 2-USTA Fecha de muestreo: // Fecha de recepción: 19 de noviembre de 2020 Envase o empaque: vidrio Tipo de muestreo: puntual Condiciones de recepción la muestra: Refrigerada Observaciones: //		Código de la muestra: 190126 Matriz: Superficial Responsable de muestreo: solicitante Procedimiento de muestreo: solicitante Tamaño de la muestra: 500 mL Plan de muestreo: // Lote: //
---	--	--

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Fecha de análisis	VARIABLE	MÉTODO	RESULTADOS	UNIDADES
19-11-2020 23-11-2020	*COLIFORMES TOTALES	SM. 9221 B	26	NMP / 100 mL
19-11-2020 22-11-2020	*COLIFORMES TERMOTOLERANTES	SM. 9221 E	4,0	NMP / 100 mL
19-11-2020 22-11-2020	*Escherichia coli	SM 9221 B, F	1,8	NMP / 100 mL

SM: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, AMWA, WEF, APHA. Edición 23th - 2017.

*** Variables realizadas en SIAMA. Acreditadas por IDEAM Resolución 1277 de 2019 extensión Resolución 0150 de 2020.**

Nota: La muestra a la que se refieren los datos de este reporte, ha sido proporcionada por el SOLICITANTE, por lo tanto, SIAMA, no es responsable del origen o fuente de donde se ha extraído dicha muestra. En consecuencia, los datos que figuran en el informe no constituyen una garantía de la representatividad de la(s) muestra(s) y por tanto se refiere(n) única y exclusivamente a dicha(s) muestra(s).

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

Este reporte de resultados es válido únicamente si tiene sello seco.



Elaboró: ANGÉLICA MARÍA JAIMES MORENO
COORDINADORA MICROBIOLOGÍA
MICROBIOLOGA. REG. FOLIO 82333-322



Revisó: BRAYAN VILLAMIZAR PÉREZ
DIRECTOR MICROBIOLOGÍA
MICROBIOLOGO. REG. FOLIO. 799 13-L

FIN DEL REPORTE DE RESULTADOS.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la autenticidad de este documento es ilegal y los coladores pueden ser procesados con el máximo rigor de la ley.

Código: R-051	Versión: 0.4	Fecha: 10/02/2020	Página: 1 de 1
----------------------	---------------------	--------------------------	-----------------------

Carrera 24 No. 36 - 11, Teléfonos +57 7 634 80 00 Celular 318 707 0821 Bucaramanga - Colombia - info@siama.co

Figura 14. Reporte de resultados microbiológicos muestra filtrada con cascarilla + AgNPs (SQ)


siama
 NIT. 804.016.152-8

REPORTE DE RESULTADOS N° MB-190125

Fecha de emisión: 28 de noviembre de 2020 Solicitante: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS Dirección: CARRERA 18 No. 9 – 27, Muestra: MUESTRA 1-USTA Fecha de muestreo: // Fecha de recepción: 19 de noviembre de 2020 Envase o empaque: vidrio Tipo de muestreo: puntual Condiciones de recepción la muestra: Refrigerada Observaciones: //		Código de la muestra: 190125 Matriz: Superficial Responsable de muestreo: solicitante Procedimiento de muestreo: solicitante Tamaño de la muestra: 500 mL Plan de muestreo: // Lote: //
---	--	--

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Fecha de análisis	VARIABLE	MÉTODO	RESULTADOS	UNIDADES
19-11-2020 23-11-2020	*COLIFORMES TOTALES	SM. 9221 B	3600	NMP / 100 mL
19-11-2020 22-11-2020	*COLIFORMES TERMOTOLERANTES	SM. 9221 E	2,0	NMP / 100 mL
19-11-2020 22-11-2020	* <i>Escherichia coli</i>	SM 9221 B, F	2,0	NMP / 100 mL

SM: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. APHA, REF. APHA. Edición 20th - 2017.

*** Variables realizadas en SIAMA. Acreditadas por IDEAM Resolución 1277 de 2019 extensión Resolución 0150 de 2020.**

Nota: La muestra a la que se refieren los datos de este reporte, ha sido proporcionada por el SOLICITANTE, por lo tanto, SIAMA, no es responsable del origen o fuente de donde se ha extraído dicha muestra. En consecuencia, los datos que figuran en el informe no constituyen una garantía de la representatividad de la(s) muestra(s) y por tanto se refiere(n) única y exclusivamente a dicha(s) muestra(s).

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.

Este reporte de resultados es válido únicamente si tiene sello seco.


Elaboró: ANGÉLICA MARIA JAIMES MORENO
 COORDINADORA MICROBIOLOGÍA
 MICROBIÓLOGA. REG. FOLIO 82333-322


Revisó: BRAYAN VILLAMIZAR PÉREZ
 DIRECTOR MICROBIOLOGÍA
 MICROBIÓLOGO. REG. FOLIO. 799 13-L

FIN DEL REPORTE DE RESULTADOS.

Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados con el máximo rigor de la ley.

Código: R – 051	Versión: 0.4	Fecha: 10/02/2020	Página: 1 de 1
------------------------	---------------------	--------------------------	-----------------------

Figura 15. Reporte de resultados microbiológicos de la muestra filtrada con cascarilla sin modificación

Apéndice E. Certificado de participación en el primer congreso internacional Objetivos de desarrollo sostenible: Esfuerzos en América Latina y el Caribe



Figura 16. Certificado de participación en primer congreso internacional, estudiante Paula Díaz



Figura 17. Certificado de participación en primer congreso internacional, estudiante Natalia Soler