

**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.**

**RAFAEL ANDRES TARAZONA CHAPARRO  
DIANA PATRICIA PEÑA VESGA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga  
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.**

**RAFAEL ANDRES TARAZONA CHAPARRO  
DIANA PATRICIA PEÑA VESGA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIEROS QUIMICOS**

**DIRECTORA:  
MARIANNY YAJAIRA COMBARIZA  
Química, Ph.D**

**COORDIRECTORA:  
PAALO ANDREA MORENO YAÑEZ  
Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga**

**2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos:

La Escuela de Ingeniería Química, Laboratorio de Consultas Industriales de la Facultad de Ciencias Básicas y a los profesores que nos han transmitido sus conocimientos y fundamentos ingenieriles.

A los doctores Mariany Yajaira Combariza, Cristian Blanco Tirado, la ingeniera Paolo Moreno y a la profesora Yolanda Vargas por permitirnos desarrollar este trabajo bajo su dirección, por su apoyo confianza e invaluable colaboración en nuestra formación profesional.

Al CEIAM (centro de estudios e investigaciones Ambientales), Al grupo de investigación GIFTEX por su disponibilidad y amabilidad durante nuestra estadia en el grupo.

A la gobernación de Santander, por su apoyo financiero y prestación de servicios.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	14
1. MARCO TEORICO .....	15
1.1 CONTAMINACION BACTERIANA EN AGUAS NATURALES. ....	15
1.1.1 Microorganismos indicadores .....	16
1.2 METODOS DE DESINFECCION DEL AGUA .....	16
1.2.1 Purificación por ozono .....	16
1.2.2 Desinfección por rayos ultravioleta (UV).....	17
1.2.3 Desinfección por cloración.....	17
1.2.4 Desinfección con nanopartículas de plata depositadas en bionanocompositos de fibras de fique .....	17
1.3 FILTROS DE CARTUCHOS.....	19
2. METODOLOGIA .....	21
2.1 Revisión bibliográfica.....	21
2.2 Preparación de las fibras de fique .....	21
2.3 Determinación de intervalos de operación del sistema de filtración. ....	22
2.4 Análisis estadístico .....	24
2.5 Etapa experimental.....	25
2.6 Análisis de espectroscopia de absorción atómica de plata.....	25
3. RESULTADOS.....	26
3.1 Preparación de las fibras de fique .....	26
3.2 Determinación de los intervalos de trabajo.....	27
3.3 Etapa experimental.....	30
3.4 Análisis estadístico .....	33

3.5 Optimización del análisis estadístico .....	34
3.6 Análisis de espectroscopia de absorción atómica de plata.....	35
CONCLUSIONES .....	36
RECOMENDACIONES.....	37
CITAS BIBLIOGRAFICAS.....	38
BIBLIOGRAFIA.....	40
ANEXOS.....	42

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Diseño factorial para el estudio de remoción coliformes totales por filtración. ....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2. Porcentaje de remoción vs cantidad de medio filtrante.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3. Dimensiones de cartuchos elaborados. ....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Porcentajes de remoción evaluados para el diseño factorial de % Remoción de Coliformes Totales. ....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 5. Porcentajes de remoción evaluados para el diseño factorial de % Remoción de Coliformes Estándar. ....</i>	<i>33</i>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Soporte metálico del cartucho. ....	23
Figura 2. a) Micrografía de fibras limpias, 1cm:10 $\mu$ m. b) Fibras con de nanoparticulas de Ag, 1cm:100nm.....	26
Figura 3. a) Fibras de fique limpias. b) Fibras de fique modificadas con nanoparticulas de plata.....	26
Figura 4. Cuerdas de fibra de fique modificada con nanoparticulas de Ag. a) Densidad lineal 0.07g/cm. b) Densidad lineal 0.15 g/cm. ....	27
Figura 5. Montaje del sistema Batch.....	29
Figura 6. Imagen de resultados de coliformes totales mediante filtración por membrana. a). Blanco. b). Reciclo 1. c). Reciclo 3. ....	29
Figura 7. % remoción vs Número de ciclos, para un cartucho de 120gr y densidades 0.15 g/cm y 0,07 g/cm. ....	30
Figura 8. a) Filtro C, b) Filtro D, c) Filtro A, d) Filtro B.....	31
Figura 9. Gráfico de Pareto estandarizado para % remoción de Coliformes Totales. ....	33
Figura 10. Gráfico de Pareto estandarizado para % remoción de Coliformes Estándar. ....	34

## INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ecuaciones de determinación del rango para el peso de medio filtrante. .....	42
Anexo 2. Datos de los resultados de la etapa experimental. ....	43
Anexo 3. Análisis de la Varianza para % Remoción CT. ....	44
Anexo 4. Análisis de la Varianza para %Remoción Cs. ....	45
Anexo 5. Optimización de Respuesta Múltiple para % Remoción CT y % Remoción CS.....	46
Anexo 6. Conveniencia Óptima.....	47
Anexo 7. Espectroscopia de absorción atómica. ....	48

## RESUMEN

**TITULO:** 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\*

**AUTORES:** RAFAEL ANDRES TARAZONA CHAPARRO  
DIANA PATRICIA PEÑA VESGA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Desinfección de agua, microorganismos coliformes, filtro tipo cartucho, tratamiento de aguas.

### DESCRIPCION:

El mayor problema asociado con la contaminación hídrica es la descarga de compuestos tóxicos y patógenos en ríos y acuíferos. En términos generales, el riesgo microbiológico está asociado con la ingestión de agua contaminada de bacterias, virus y parásitos causantes de enfermedades contagiosas. Por esta razón, es de gran importancia encontrar nuevas alternativas y técnicas como la implementación de tecnologías de producción más limpia que controlen la remoción de microorganismos en aguas naturales para la recuperación y conservación del recurso. En este trabajo se estudia la eficiencia de remoción de microorganismos patógenos con un filtro tipo cartucho utilizando como medio filtrante bionanocompositos de fibras de fique con nanopartículas de plata aprovechando la biodiversidad de los materiales poliméricos naturales junto con las propiedades bactericidas de la plata en forma nanoparticulada, Se propone una metodología general de evaluación de las variables de operación peso de biomaterial, densidad lineal del medio filtrante y periodo de recirculación mediante un análisis estadístico con el fin de hallar los valores que generen un mayor porcentaje de remoción de coliformes. Los resultados muestran que los biocompositos de fique y nanopartículas de plata pueden ser utilizados como medio filtrante para un filtro tipo cartucho generando una nueva alternativa para el tratamiento de aguas naturales contaminadas, donde la eliminación de microorganismos patógenos dependen principalmente del peso del biomaterial y el periodo de recirculación.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora MARIANNY YAJAIRA

COMBARIZA: Química, Ph.D; Coodirectora: PAALO ANDREA MORENO YAÑEZ: Ingeniera Química

## ABSTRACT

**TITLE:** *STUDY OF THE REMOVAL OF NATURAL WATER COLIFORM USING A WATER FILTER CARTRIDGE PACKED WITH NANOCOMPOSITES OF SISAL NANOPARTICLES WITH SILVER FIBERS\**

**AUTHORS:** *DIANA PATRICIA PEÑA VESGA*  
*RAFAEL ANDRES TARAZONA CHAPARRO\*\**

**KEYWORDS:** Disinfection of water, coliform, cartridge filter, water treatment.

### DESCRIPTION:

The greater problem associated with water pollution is the discharge toxic compound and pathogenic in rivers and aquifers. In general terms, the microbiological risk is associate with the contaminated water ingestion like bacteria, virus and parasite, causing contagious diseases. For this reason, it is of great importance finding new alternatives and techniques like the implementation of technologies of production cleaner than control the removal of microorganisms in natural waters for the recovery and conservation of the resource. In this paper the we study efficiency of removal of pathogenic microorganisms with a cartridge filter used as a filter medium bionanocomposito of fibers of fique with silver nanoparticles being useful the biodiversity the natural polymeric materials along with the bactericidal properties of silver in nanopartículada form, We propose a general methodology for evaluating the operating variables: biomaterial weight, linear density of the filter medium and recirculation period by statistical analysis to find the values that generate a higher percentage of coliform removal. The results show that biocomposites of fique and silver nanoparticles can be used as filter medium cartridge filter for generating a new alternative for treating polluted natural waters, where the elimination of pathogenic microorganisms depend mainly on the weight of the biomaterial and the period recirculation.

---

\* Grade work

\*\* Physical Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Directora Marianny Yajaira Combariza: Química, Ph.D; Coodirectora: Paolo Andrea Moreno Yañez: Ingeniera Química.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los problemas asociados con la contaminación hídrica es la descarga de organismos patógenos en las distintas corrientes naturales utilizadas sin ningún control en la irrigación de cultivos, ganadería y para el consumo humano.

Por esta razón, es de gran importancia encontrar nuevas alternativas y técnicas que controlen de forma viable, segura y de fácil acceso la remoción de patógenos en aguas naturales. Entre las posibles soluciones sobresale el aprovechar la biodiversidad de materiales poliméricos naturales, como las fibras naturales de fique, junto con las comprobadas propiedades bactericidas de la plata en forma nanoparticulada.

En esta investigación, se utilizaron fibras de fique modificadas superficialmente con nanopartículas de plata, por medio de síntesis *in situ*, para empacar un filtro tipo cartucho y emplearlo en un sistema de filtración continua. En el estudio realizado, se seleccionaron las variables que influyen en la eficiencia del proceso de filtración y se realizó un análisis estadístico que permitió establecer las combinaciones de parámetros operativos que permitan obtener aguas crudas con menor carga de microorganismos.

## **1. MARCO TEORICO**

Uno de los mayores problemas asociados con la contaminación hídrica es la descarga de organismos patógenos, provenientes de aguas negras sin tratar, en corrientes de aguas naturales. Para evitar las consecuencias del uso del agua contaminada con coliformes se han ideado mecanismos de control temprano para su tratamiento. En la actualidad existen normas que establecen los rangos permisibles de este tipo de contaminación, que buscan asegurar que el agua que se utiliza no sea nociva (1) (2).

### **1.1 CONTAMINACION BACTERIANA EN AGUAS NATURALES.**

Las enfermedades transmitidas por el agua, que siguen siendo uno de los problemas de salud más importantes en el mundo, se encuentran asociadas con la contaminación producto de la descarga de compuestos tóxicos y patógenos en ríos y acuíferos. En términos generales, el mayor riesgo microbiológico está asociado con la ingestión de agua contaminada con heces humanas o animales. Las heces son una fuente de organismos patógenos como bacterias, virus y parásitos (*e.g.*, protozoos y helmintos). Las enfermedades contagiosas causadas por estos organismos son las más comunes y endémicas (1).

Los microorganismos patógenos pueden causar en el ser humano enfermedades crónicas como la gastroenteritis severa y eventualmente fatales como la disentería, el cólera y la fiebre tifoidea. La presencia de estos microorganismos en el agua se debe principalmente a sistemas de abastecimiento de agua potable y sanitario inadecuado y/o ineficiente, así como de la falta de conciencia en el uso y preservación de los recursos hídricos.

### **1.1.1 Microorganismos indicadores**

Los métodos de monitoreo empleados habitualmente para detectar microorganismos potencialmente patogénicos en aguas naturales se basan en el cultivo y enumeración de indicadores fecales de bacterias *i.e.* *Coliformes totales*, *Coliformes fecales*, *Escherichia coli* y *Streptococos fecales* (3) (4).

*Escherichia colis* un bacilo corto Gram negativo que existe normalmente como comensal en el intestino delgado de humanos y animales. Sin embargo, hay algunas cepas de *E. coli* patógenas que provocan enfermedades diarreicas (5) (6).

Este microorganismo se considera el indicador más representativo de las fuentes de patógenos de origen fecal por su habilidad de indicar la contaminación fecal del agua, y la presencia de otros patógenos como *Salmonella Typhoid*, *Campylobacter*, *Ristosporidium* o *Giardia*, ya que se detecta en corrientes naturales en concentraciones 1000 veces mayores que dichos patógenos.

## **1.2 METODOS DE DESINFECCION DEL AGUA**

La desinfección es la destrucción de los microorganismos patógenos del agua ya que su presencia en el líquido es perjudicial para la salud. Existen diferentes desinfectantes, que pueden eliminar o desactivar los microorganismos patógenos. Entre estos están el cloro o sustancias que contienen cloro, los peróxidos, la plata y el cobre, el ozono y los rayos UV (7).

### **1.2.1 Purificación por ozono.**

En este método de purificación se emplea como agente inhibidor el oxígeno enriquecido ( $O_3$ ). Debido a que es la forma más activa del oxígeno es capaz de destruir virus, bacterias, parásitos, priones, hongos, mohos, esporas y muchos otros contaminantes por oxidación en pocos segundos. Una ventaja del ozono es que no deja residuos en la sustancia a desinfectar, ya que al ser muy reactivo, rápidamente se descompone en oxígeno. No obstante la desventaja del ozono es

que, dada su inestabilidad, es muy difícil almacenarlo, por lo que se tiene que producir justo en el lugar donde se aplica lo cual resulta un método costoso. (8) .

### **1.2.2 Desinfección por rayos ultravioleta (UV).**

En este método se utilizan ondas cortas de radiación ultravioleta que inciden sobre el material genético (ADN) de los microorganismos y los virus, destruyéndolos en corto tiempo, sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada, sin embargo tiene como desventaja que la luz ultravioleta no proporciona residuales. Esto quiere decir que después de la desinfección por este sistema hay que aplicar un compuesto químico para garantizar la seguridad microbiológica del agua durante todo su trayecto por la red de distribución y aun para cuando se almacena en las viviendas (9).

### **1.2.3 Desinfección por cloración.**

Este proceso de higienización, el más utilizado en la actualidad debido a su bajo costo, emplea como agente desinfectante cloro o compuestos clorados que causan alteraciones físicas, químicas y bioquímicas en la pared celular, de esta forma se destruye la barrera protectora de la célula dejándola indefensa y disminuyendo sus funciones vitales hasta llevarla a la muerte. Una de las principales desventajas del uso de cloro y derivados es que reacciona con mucha materia orgánica y da lugar a trihalometanos (THM) muchos de los cuales se ha demostrado son tóxicos o carcinogénicos. Otro inconveniente es la formación de clorofenoles en aguas que contienen fenoles, lo que daría lugar a malos olores (10).

### **1.2.4 Desinfección con nanopartículas de plata depositadas en bionanocompositos de fibras de fique.**

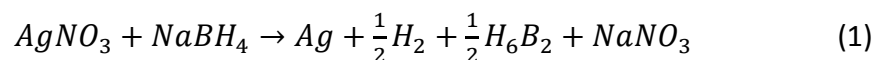
La plata ha sido conocida desde tiempos inmemoriales como un efectivo agente antimicrobial, los compuestos que la contienen se han usado para prevenir el

ataque de microorganismos en catéteres, tejidos humanos, entre otros. Las diferentes propiedades que presentan las nanopartículas de plata son bactericidas, coloración, reactividad y relación área/volumen, las cuales dependen de su forma y tamaño.

Los Bionanocompositos representan un grupo de nanoestructuras que son formados por la combinación de polímeros naturales y de sólidos inorgánicos. Las fibras de fique están compuestas por celulosa natural, tienen una estructura porosa de microfibras de 10 – 30 nm de ancho que están tridimensionalmente conectadas una a otra; tales características morfológicas pueden proveer un molde natural en el cual se pueden sintetizar nanopartículas metálicas (11).

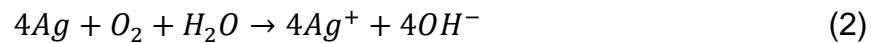
La síntesis *in situ* de nanopartículas de metales nobles (Ag, Au, Pt, Pb), se lleva a cabo bajo condiciones ambientes; usando los poros de las fibras de celulosa como nanoreactores. Este método consiste básicamente en la deposición de iones metálicos sobre la matriz, que en este caso corresponde a las fibras de fique, seguido por la reducción de estos iones metálicos, generando las nanopartículas que iniciarán a depositarse sobre los nanoporos de las fibras (12).

El proceso de síntesis de las fibras de fique se realiza mediante la impregnación por reducción de nitrato de plata ( $AgNO_3$ ). Este se reduce en solución acuosa desionizada de borohidruro de sodio ( $NaBH_4$ ), para evitar reacciones secundarias con las sales del agua común, de acuerdo a la siguiente reacción:



Dependiendo de la concentración de la solución del metal utilizado, las fibras toman diferentes coloraciones. A mayor concentración se observa una coloración más oscura (13).

La plata en su estado metálico es inerte, reacciona con la humedad y se ioniza. Debido a la disolución oxidativa se presume que las nanopartículas de plata se convierten en iones de plata de acuerdo a la siguiente reacción (13):



El mecanismo exacto de acción de la plata en los microorganismos no se conoce todavía, pero los estudios realizados indican que:

- La plata ionizada es altamente reactiva, ya que se une a las proteínas de los tejidos y provoca cambios estructurales en la pared celular bacteriana y la membrana nuclear que lleva a la distorsión y la muerte celular. La plata también se une al ADN bacteriano y ARN por desnaturalización e inhibe la replicación bacteriana (14) (15) (16) (17).
- La acción de la plata está relacionada con su interacción con los compuestos que se encuentran en el grupo tiol de las enzimas respiratorias de las células bacterianas. Esta se une a la pared celular bacteriana y la membrana celular e inhibe el proceso de la respiración causando la muerte del microorganismo (18).

### **1.3 FILTROS DE CARTUCHOS**

La característica esencial de un filtro cartucho es su carcasa cilíndrica, generalmente a presión para soportar la presión en el fluido filtrado, en esta se encuentra un elemento de filtro reemplazable, que es el cartucho. Este elemento es también de forma cilíndrica, y la mayoría de estos se hacen a un conjunto de medidas y diámetros estándar, para poder ser incorporados en viviendas comunes (19).

El medio filtrante es la parte del cartucho que elimina el contaminante. Empieza en forma de capa y se pliega después para exponer más área de superficie al flujo de fluido. Este reduce la diferencial de presión mientras aumenta la capacidad de

retener suciedad. Los medios filtrantes que se conocen normalmente son de "superficie" o "profundidad". El cartucho que se va a utilizar en este trabajo se cataloga como un medio de profundidad donde el fluido se mueve por caminos indirectos a través del material que compone el medio filtrante. Por su construcción, un medio filtrante de tipo de profundidad tiene muchos poros de tamaños diferentes.

La industria de filtración utiliza la "Prueba de procedimiento de Paso Múltiple" para evaluar el rendimiento del cartucho filtrante. Durante la prueba de paso múltiple, el fluido circula por el circuito en condiciones precisamente controladas. Como resultado de la prueba de paso múltiple se evalúa la razón de filtración que es una medida de la eficacia de remoción de partículas de un cartucho filtrante (19).

En el presente estudio se evaluaron algunas variables influyentes en la operación de un filtro tipo cartucho encordonado, que usa como medio filtrante fibras de fique modificadas con nanopartículas de plata, con el objetivo de establecer las condiciones bajo las cuales se observa mayor remoción de coliformes en aguas crudas.

## 2. METODOLOGIA

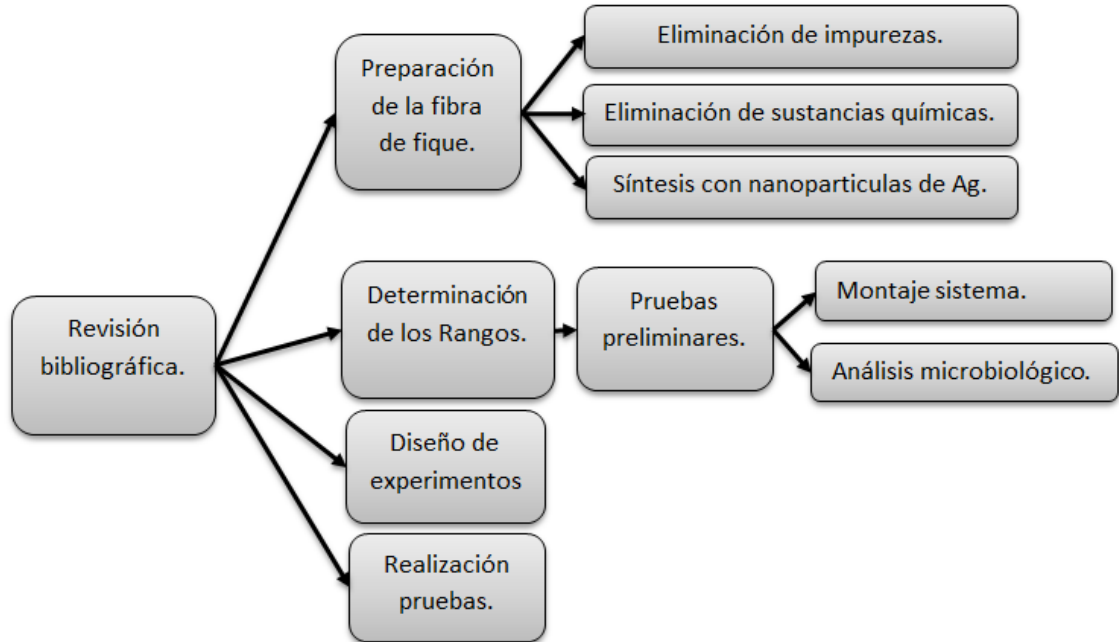


Figura 1. Diagrama de metodología planteada.

### 2.1 Revisión bibliográfica

Se investigó sobre los efectos inhibidores de la plata en los microorganismos patógenos, métodos de desinfección, tipos de microorganismos, métodos de caracterización de aguas, y análisis de métodos experimentales, en revistas indexadas, libros, bases de datos y tesis de grado.

### 2.2 Preparación de las fibras de fique

Para utilizar las fibras como soporte para las nanopartículas de plata es necesario realizar limpieza del material de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Eliminación de fibras cortas mediante cepillado.

- Eliminación de impurezas (particularmente colorantes, lignina y carbonato de calcio) mediante ultrasonido (Baño ultrasónico BRANSON 3510) durante 120 minutos a una temperatura de 60°C. Una vez limpias las fibras se secan en una estufa (MEMMERT) a 60°C durante 24h.

### **Síntesis de nanopartículas de plata.**

Las fibras limpias se sumergen inicialmente en una solución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ , 3mM en agua desionizada) a 60°C por 30 minutos durante los cuales se adhieren los iones  $\text{Ag}^+$  a los poros de la celulosa. Posteriormente se sacan de la solución y se transfieren a una solución reductora de borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ , 20mM en agua desionizada) a 60°C por 10 minutos para asegurar la reducción de  $\text{Ag}^+$  a Ag metálica. Finalmente las fibras se retiran de la solución, se lavan y se secan en una estufa a 60°C durante 24 horas.

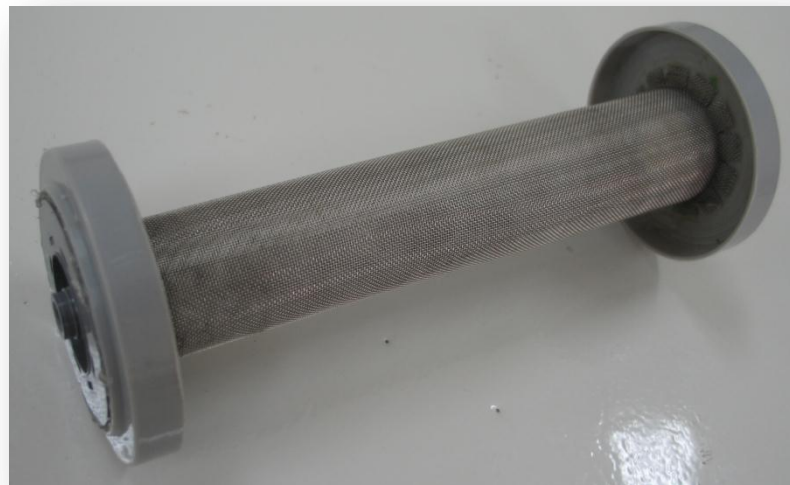
### **2.3 Determinación de intervalos de operación del sistema de filtración.**

Con el objetivo de aumentar la remoción de coliformes de una muestra de agua natural se seleccionaron las variables de densidad lineal, cantidad de fibras (g) y número de ciclos por ser factores representativos en el proceso de filtración.

Con el fin de tener mayor área de contacto con el medio filtrante se seleccionó un sistema batch para evaluar la eficiencia que tiene el cartucho mediante la prueba de procedimiento de “paso múltiple”. Para la determinación de los intervalos de las variables se realizaron las siguientes pruebas:

- *Densidad Lineal*: Se elaboraron cuerdas con fibras de fique modificadas con Ag y cuerdas con fibras limpias, mediante el método artesanal de encordonado, que presentaban dos densidades lineales diferentes. De esta forma se controló la superficie de contacto del medio filtrante con el fluido.

- *Cantidad de fibras:* Se realizaron tres pruebas iniciales para establecer la efectividad del biocomposito de fique y nanopartículas de plata en la remoción de coliformes en aguas. Inicialmente en vasos de precipitados de con 200mL de agua cruda con 2000 UFC/100mL de coliformes totales (fecales) y 2500 UFC/100mL de coliformes estándar (mesofilos) se introdujeron cantidades variables del material biocompuesto durante un tiempo determinado.
- *Número de ciclos:* Para esta prueba fue necesario construir un sistema tipo batch, el cual se utilizó posteriormente para todos los experimentos. Para esta prueba también se construyeron dos filtros con el biocomposito a dos densidades lineales, el cual consiguiera recubrir la totalidad del soporte de malla metálica inoxidable de 40 Mesh (*figura 1*), donde se promedió el peso de estos dos cartuchos, para luego ser sometido a varios ciclos con un caudal determinado para establecer dicho rango.



*Figura 1. Soporte metálico del cartucho.*

Para el conteo de coliformes se realizaron análisis microbiológicos de filtración por membranas (20). Las pruebas microbiológicas se realizaron en el Laboratorio de Consultas Industriales de la Facultad de Ciencias Básicas.

## 2.4 Análisis estadístico

El diseño de experimentos ha probado ser una poderosa herramienta en la ciencia y tecnología para investigación y optimización de productos y procesos. Usando esta técnica es posible investigar sistemáticamente y eficazmente las principales variables que controlan un proceso y sus correlaciones (21).

Una vez establecidos los intervalos de trabajo para la densidad lineal del lecho, peso del material filtrante (biocompuesto) y número de ciclos se procedió a estudiar el comportamiento de estas variables, para dos niveles de operación, mediante un diseño factorial. Se efectuaron réplicas de cada experimento con el fin de obtener una medida de error experimental (*ver tabla 1*).

Para el análisis estadístico se utilizó el software *Statgraphics 5.1*. El diseño factorial de experimentos siguió una estructura  $2^3$ .

*Tabla 1. Diseño factorial para el estudio de remoción coliformes totales por filtración.*

		Densidad 1	Densidad 2
Ciclo 1	Peso 1	X <sub>C1.P1.D1</sub>	X <sub>C1.P1.D2</sub>
		Y <sub>C1.P1.D1</sub>	Y <sub>C1.P1.D2</sub>
	Peso 2	X <sub>C1.P2.D1</sub>	X <sub>C1.P2.D2</sub>
		Y <sub>C1.P2.D1</sub>	Y <sub>C1.P2.D2</sub>
Ciclo 2	Peso 1	X <sub>C2.P1.D1</sub>	X <sub>C2.P1.D2</sub>
		Y <sub>C2.P1.D1</sub>	Y <sub>C2.P1.D2</sub>
	Peso 2	X <sub>C2.P2.D1</sub>	X <sub>C2.P2.D2</sub>
		Y <sub>C2.P2.D1</sub>	Y <sub>C2.P2.D2</sub>

Donde,  $X_{Ci,Pj,Dk}$  es la respuesta observada cuando el número de ciclos se encuentra en el i-esimo nivel, el peso en el j-esimo nivel y la densidad en el k-esimo nivel, y  $X_{ijk}$  son sus respectivas replicas.

El parámetro de respuesta para analizar la influencia de cada una de las variables será el porcentaje de remoción de microorganismos patógenos (coliformes totales).

De acuerdo con el diseño de experimentos planteado, se realizaron 16 pruebas con fibras de fique modificadas con nanopartículas de plata, y 8 en donde se utilizaron fibras de fique crudas como blanco, para un total de 24 pruebas. Con esta estructura experimental y el análisis estadístico se estableció la dependencia del parámetro de respuesta con las tres variables consideradas.

## **2.5 Etapa experimental**

Se elaboraron 4 cartuchos de filtración del tipo encordado de fibras de fique modificadas con nanopartículas de Ag con su respectivo duplicado y adicionalmente se elaboraron 4 cartuchos con fibras de fique crudas. En todas las pruebas se utilizaron 12 litros de agua cruda, los cartuchos fabricados se expusieron a un caudal de 0.128 L/s haciendo una aproximación a un caudal de acueducto residencial. Las muestras para determinar coliformes se tomaron a diferentes ciclos y se analizaron mediante la técnica de filtración por membranas para realizar el conteo de la cantidad de coliformes removidos.

## **2.6 Análisis de espectroscopia de absorción atómica de plata.**

Se realizó un análisis de absorción atómica a una muestra de agua filtrada en el cartucho, para determinar la concentración de plata y calcular el desprendimiento de las nanopartículas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Preparación de las fibras de fique

Las fibras de fique modificadas superficialmente se obtuvieron mediante el método de síntesis *in situ*. El color de las fibras crudas (crema) cambia a amarillo oscuro después de la síntesis de las nanopartículas (12). El análisis microscópico de los materiales permite observar una distribución homogénea de las nanopartículas sobre la superficie de la fibra (ver figura 2 y 3).

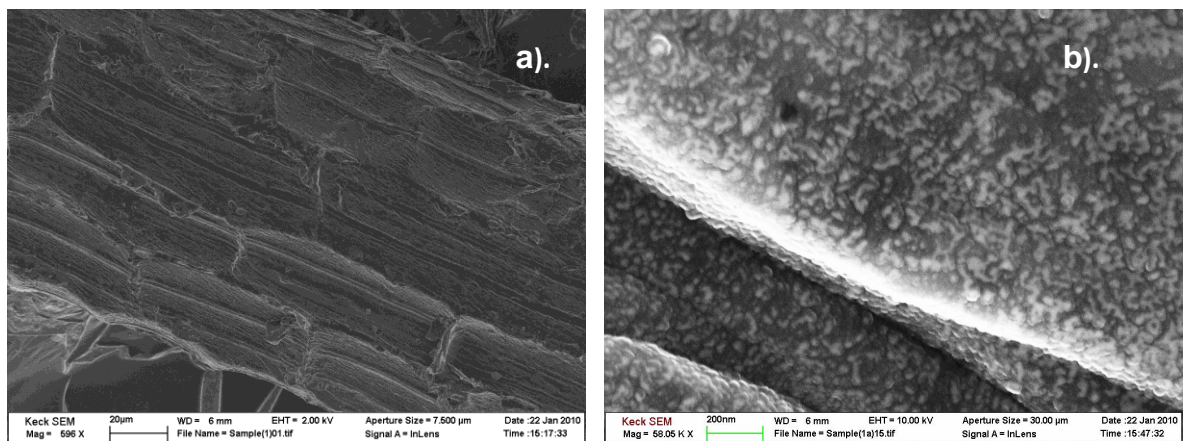


Figura 2. a) Micrografía de fibras limpias, 1cm:10µm. b) Fibras con de nanopartículas de Ag, 1cm:100nm.



Figura 3. a) Fibras de fique limpias. b) Fibras de fique modificadas con nanopartículas de plata.

### 3.2 Determinación de los intervalos de trabajo

Según las pruebas preliminares realizadas se establecieron los intervalos a usar en el diseño de experimentos, analizando los siguientes resultados observados:

- *Densidad Lineal:* Las cuerdas elaboradas con fibras de fique, mediante el método artesanal de encordonado (figura 5), presentaron densidades lineales de 0,07g/cm y 0,15g/cm. Estas densidades se establecieron para asegurar la homogeneidad en el hilado de las fibras en el cartucho, para establecer la cantidad de fibras en los experimentos, y para conocer el área de contacto del agua con el medio filtrante.



Figura 4. Cuerdas de fibra de fique modificada con nanopartículas de Ag. a) Densidad lineal 0.07g/cm. b) Densidad lineal 0.15 g/cm.

- *Cantidad de fibras (en peso):* La prueba se realizó con aguas crudas que contenían aproximadamente 2000 UFC/100mL de coliformes totales (CT) y

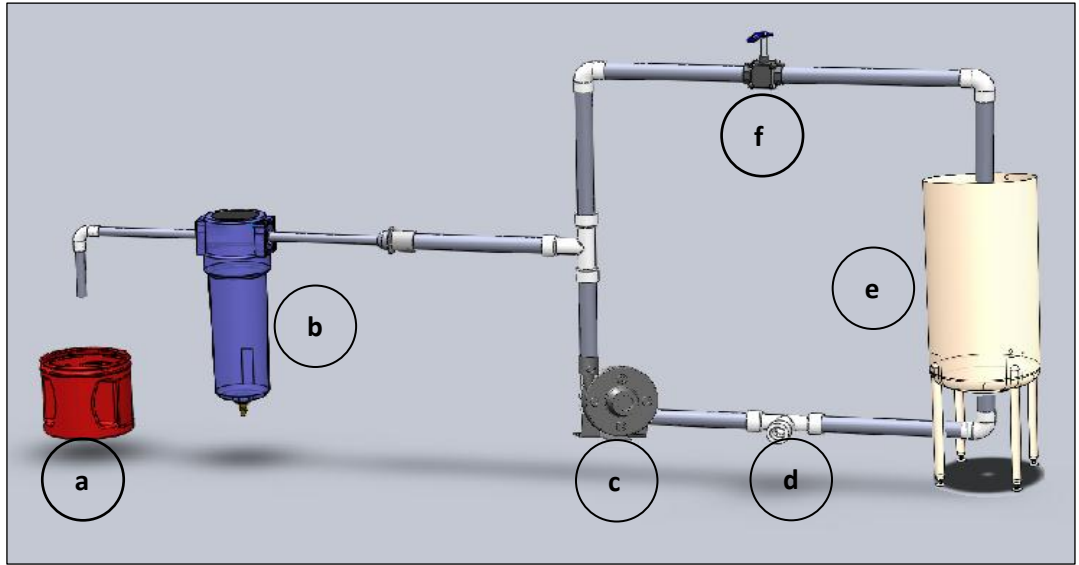
2500 UFC/100mL de coliformes estándar (CS). Los resultados se observan en la tabla 2. :

*Tabla 2. Porcentaje de remoción vs cantidad de medio filtrante.*

Peso (gramos) fibra con Ag	CT <sub>f</sub> UFC/100ml	CS <sub>f</sub> UFC/100ml	% Remoción de CS	% Remoción de CT
<b>2 g</b>	153	1023	59,1%	<b>92,3%</b>
<b>4 g</b>	42	864	65.4%	<b>97,9%</b>
<b>6 g</b>	0	168	93.3%	<b>100,0%</b>
<b>8 g</b>	0	127	94,9%	<b>100,0%</b>

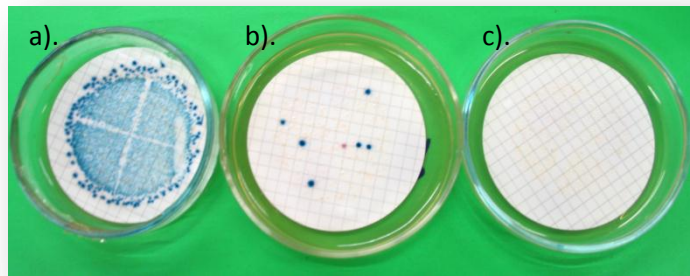
Analizando los resultados de la prueba microbiológica de filtración por membrana recopilados en la tabla 2, se observa que la mayor remoción de coliformes se produce a partir de los 6 g de fibra modificada con nanopartículas de Ag para 200mL de agua cruda usada. Para la prueba en batch (con 12 L de agua) se estableció que la cantidad de material filtrante (tanto para cuerdas de fique tratadas como para la elaboración de los respectivos blanco o fibras limpias sin sintetizar) es de 120 g aproximadamente. Este valor se calculó usando una relación directa (método de la regla de tres compuesta e inversa, *ver anexo 1*). Y para el valor del rango superior se estableció pesando el filtro con la mayor capacidad de cuerdas envueltas sobre el soporte de malla metálica, el cual peso aproximadamente 180g.

- *Numero de ciclos:* Para la construcción del sistema tipo batch se empleó un filtro de 7 pulgadas tipo cartucho con un volumen de 680 mL, una bomba eléctrica de ½ hp de fuerza referencia IDB-35 y tubería pvc de 1 y ½ pulgada. Para mantener constante el caudal de trabajo se hizo un reciclo adicional al sistema debido a que se contaba con un equipo de bombeo de mayor potencia el cual generaba mayor presión que no podía ser soportada por el filtro (*ver figura 5*).

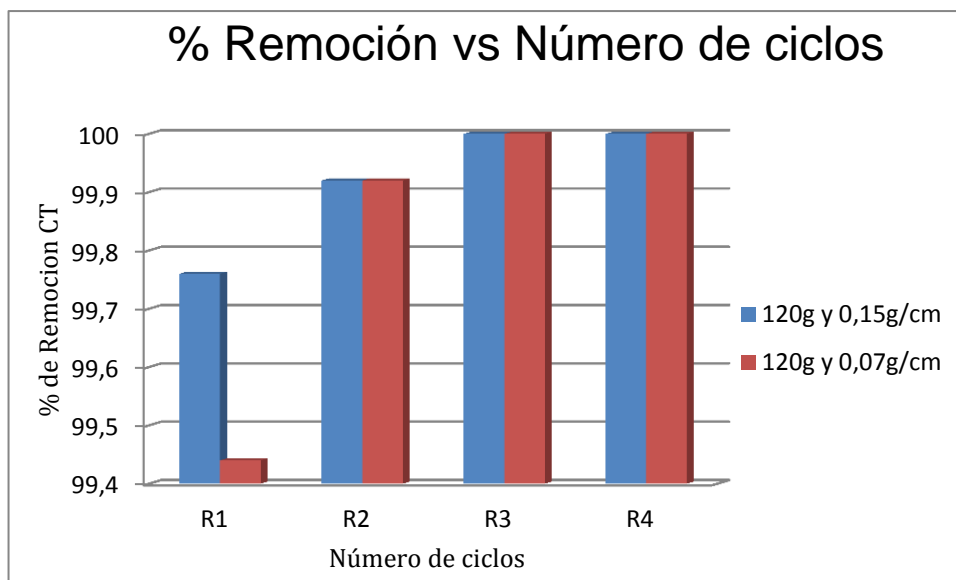


*Figura 5. Montaje del sistema Batch. a). Recipiente recolector de muestras, b). Filtro tipo cartucho, c). Bomba eléctrica, d) Válvula para drenaje, e). Tanque alimentador, f). Válvula de flujo.*

En la prueba realizada para establecer el número apropiado de ciclos necesarios para un mayor porcentaje de remoción, se utilizaron las siguientes condiciones experimentales: dos cartuchos filtrantes cada uno con 120g de fibra de fique modificada (la diferencia entre los dos cartuchos fue la densidad líneal del hilo); donde se tomaron muestras durante 5 ciclos; una muestra de 12 litros de agua contaminada cruda; y un caudal de 0.128 L/s. Bajo estas condiciones se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 6 y 7).



*Figura 6. Imagen de resultados de coliformes totales mediante filtración por membrana. a). Blanco. b). Reciclo 1. c). Reciclo 3.*



*Figura 7. % remoción vs Número de ciclos, para un cartucho de 120gr y densidades 0.15 g/cm y 0,07 g/cm.*

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas preliminares, se establecieron los siguientes valores para los intervalos de trabajo de las variables seleccionadas con respecto a la eliminación de coliformes totales:

- Cantidad de medio filtrante: 120g y 180g
- Numero de ciclos: R1 y R3 (siendo el primer y el tercer ciclo)
- Densidad lineal: 0.07g/cm y 0.15g/cm

### **3.3 Etapa experimental**

Teniendo en cuenta los intervalos de trabajo establecidos se ensamblaron cuatro cartuchos, cada uno con densidades y pesos diferentes con fibras de fique modificadas con nanopartículas de plata, los cuales tienen las características descritas en la tabla 3 e ilustradas en la figura 8:

Tabla 3. Dimensiones de cartuchos elaborados.

Filtros	Densidad lineal [ g/cm ]	Peso [ g ]
Filtro A	0.07	120
Filtro B	0.15	120
Filtro C	0.07	180
Filtro D	0.15	180



Figura 8. a) Filtro C, b) Filtro D, c) Filtro A, d) Filtro B.

Se tomaron muestras para su respectivo análisis microbiológico por medio de la técnica de filtración por membranas, en donde se observaron una disminución de microorganismos patógenos, los resultados se encuentran recopilados en el anexo 2.

Además todas las pruebas mencionadas anteriormente también se realizaron con fibras de fique crudas (sin nanopartículas). Los resultados demuestran que las fibras de fique crudas no presentan propiedades bactericida significativas, por consiguiente estas pruebas no fueron tomadas en cuenta en el diseño de experimentos.

Los resultados de los porcentajes de remoción de coliformes totales y estándar para cada uno de los ensayos del diseño factorial mostrados en la tabla 1, y obtenidos mediante la recopilación del anexo 2, son reportados en la tabla 5 y 6. Con cada resultado se reporta la desviación calculada con las réplicas para cada ensayo.

*Tabla 4. Porcentajes de remoción evaluados para el diseño factorial de % Remoción de Coliformes Totales.*

		Densidad 1	Densidad 2
		0,07 g/cm	0,15 g/cm
<b>Ciclo: R1</b>	120 g	99,76	99,44
		99,72	98,88
	180 g	99,06	98,62
		98,70	98,88
<b>Ciclo: R3</b>	120 g	100,00	99,92
		99,91	99,83
	180 g	99,65	99,83
		99,91	99,83

Tabla 5. Porcentajes de remoción evaluados para el diseño factorial de % Remoción de Coliformes Estándar.

		Densidad 1	Densidad 2
		0,07 g/cm	0,15 g/cm
Ciclo: R1	120 g	75,00	78,35
		73,81	80,57
	180 g	83,25	89,66
		80,54	89,42
Ciclo: R3	120 g	84,54	89,95
		83,22	90,38
	180 g	85,66	92,00
		90,38	92,13

### 3.4 Análisis estadístico

Con el fin de determinar el efecto e influencia que tiene cada una de las variables analizadas sobre los porcentajes de remoción hallados, se procede a calcular la significancia de Fischer (F), para cada variable mediante el software *Statgraphic* 5.1. Para el análisis los factores de densidad y número de ciclos se tomaron como variables discretas, mientras que el factor de peso se seleccionó como una variable continua.

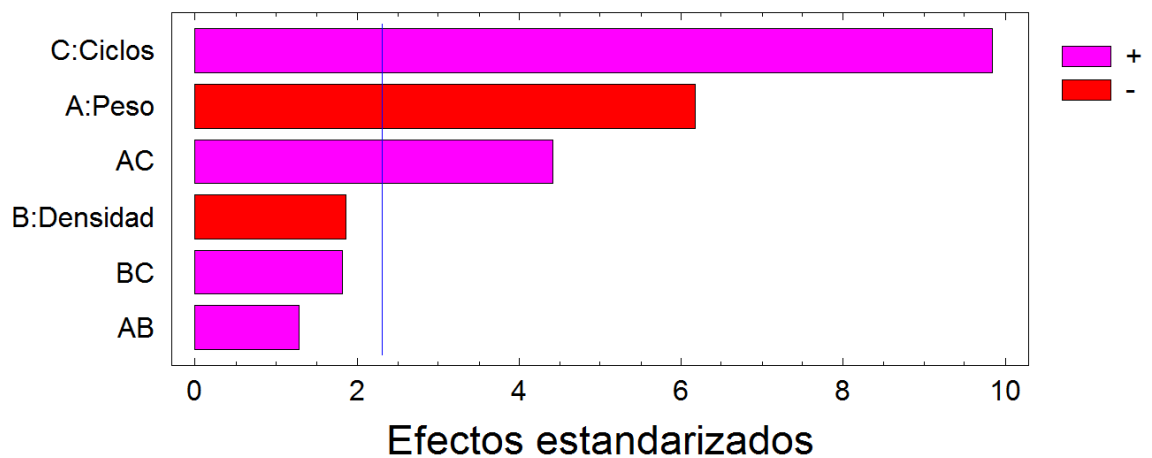


Figura 9. Gráfico de Pareto estandarizado para % remoción de Coliformes Totales.

Con base a la figura 9, se puede establecer que el número de ciclos, seguido por el peso, y la interacción entre estas dos variables, son factores significativos en el proceso de remoción de coliformes totales, además, se evidencia que la densidad lineal del empaque no es un factor influyente en el proceso.

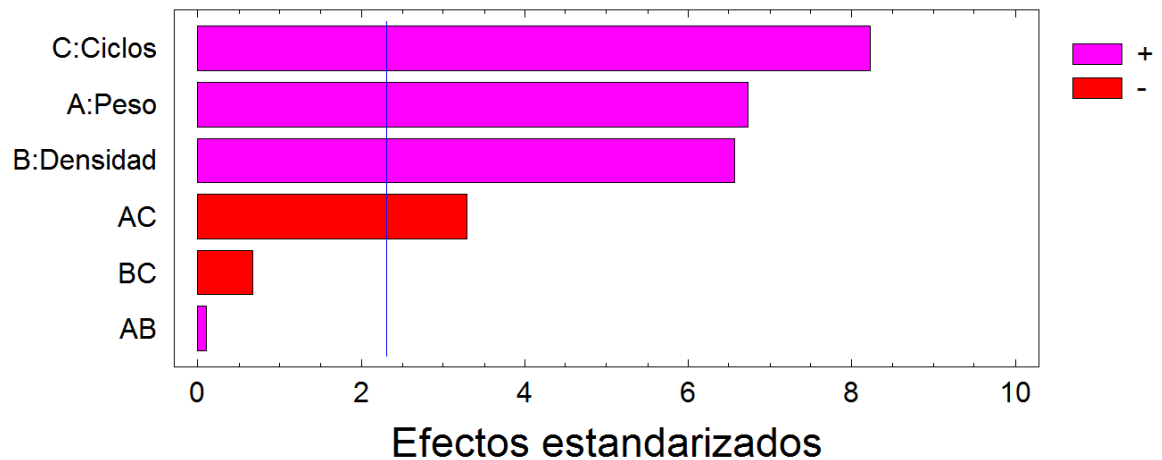


Figura 10. Gráfico de Pareto estandarizado para % remoción de Coliformes Estándar.

En la figura 10 también se observa que el número de ciclos, seguido por el peso y la densidad, son los factores influyentes en proceso de remoción de coliformes estándar, al igual que la interacción entre el peso y el ciclo.

### 3.5 Optimización del análisis estadístico

Según la optimización del diseño de experimentos llevado a cabo (ver anexo 5 y 6) se han determinado los valores óptimos para las variables de operación del proceso de desinfección:

- Peso: 167.09 g.
- Densidad: 0.149 g/cm.
- Número de ciclos: 3.

Estos valores están comprendidos para una remoción de 99,85% y 92.0%, tanto de coliformes totales como coliformes estándar respectivamente.

### **3.6 Análisis de espectroscopia de absorción atómica de plata.**

Se determinó la concentración de plata presente en el agua antes y después de la realización de un experimento, por medio del método de absorción atómica (22), en la cual se obtuvo un cambio en la concentración de plata en 0.020 mg/L a 0.031 mg/L, donde se presenta un desprendimiento aproximadamente de 0.011 mg/L, sin embargo la resolución 2115 de 2007 no determina que la plata sea una sustancia peligrosa (2).

## CONCLUSIONES

Se demostró que las fibras de fique modificadas con nanopartículas de plata pueden ser usadas como medio filtrante para un filtro tipo cartucho encordonado. Adicionalmente el material puede ser empleado para la desinfección de agua cruda contaminada con coliformes donde la actividad bactericida del material se debe a la acción de la plata metálica. Los resultados de esta investigación demuestran que los biocompositos de fique y nanopartículas de plata pueden ser utilizados como una nueva alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con microorganismos patógenos.

El estudio de las variables de operación, dentro de sus respectivos rangos de trabajo, permitió establecer que el porcentaje de remoción de coliformes depende de las variables: peso del material filtrante y la cantidad de ciclos. Por otra parte, el factor de densidad lineal del encordonado no influye en la eliminación de coliformes totales. Sin embargo no es prudente descartarlo, ya que si influyen en el porcentaje de remoción de coliformes estándar. Por ende, las condiciones de operación que permitieron la mayor eficiencia en la remoción de coliformes corresponden a un filtro tipo cartucho encordonado con un peso de material filtrante de 180 g, una densidad lineal de encordonado de 0.15 g/cm y reciclo de 3 veces el tiempo de residencia en el filtro.

Además el análisis estadístico permitió establecer que los valores adecuados para la mayor remoción de coliformes corresponden a una cantidad de 167 gramos de material filtrante (biocompuesto de fique y nanopartículas de plata), con densidad lineal de 0.15g/cm y un periodo de circulación de 3 ciclos.

## RECOMENDACIONES

Las siguientes son algunas recomendaciones que surgieron durante el desarrollo de este trabajo:

Considerar el estudio con otros factores tales como la presión, el caudal y tamaño de cartucho del filtro que generen una mejor área de contacto entre el fluido y el medio filtrante que permita mayor remoción de coliformes de las aguas naturales.

Realizar la caracterización del filtro seleccionado para determinar las propiedades físicas como porosidad, vida útil del cartucho y análisis de factibilidad económica.

## CITAS BIBLIOGRAFICAS

1. **OMS - Organizacion Mundial de la Salud.** Guidelines for drinking water quality . 3er. Ginebra : s.n., 2006, Vol. 1, págs. 3-122.
2. **Comisión de Regulacion de Agua Potable y Saneamiento Básico.** *Normas de Calidad de agua (Resolucion 2115, Decreto 1575).* Colombia : s.n., 2007.
3. **CHAPRA, S;.** *Surface Water- Quality Modelling.* New York : The McGraw-hill Companies, 1997. págs. 503-507.
4. *Microbial Source Tracking: State of the Science.* **SIMPSON, J; Santodomingo, J; Reasoner, D.;** s.l. : Environmental Science & Technology, 2002, Vol. 36, págs. 5279-5288.
5. *Development of a coupled pathogen-hydrologic catchment model.* **HAYDON, S; Deletic, A.;** s.l. : Journal of Hydrology, 2006, Vol. 328, págs. 467-480.
6. *Fate and Transport of pathogens in lakes and resevoirs.* **BROOKES, J; Antenucci, J; Hipsey, M; Burch, M; Ashbolt, N; Ferguson, C.;** s.l. : Environment International, July de 2004, Vol. 30, págs. 741-759.
7. **USEPA.** *Guidance Manual Alernative Disinfectantes and Oxidants.* 1999. págs. 8-1 - 8-25.
8. **WHITE, G C;.** *Handbook of chlorination and alternative disinfectants.* [ed.] John Wiley & sons. s.l. : Wiley- Interscience Publication, 1999. págs. 1153-1202.
9. *Light compendium- ultraviolet: principles and applications.* **BOLSON, J;.** s.l. : USEPA-Newsletter, 1999, págs. 9-37.
10. *Meta-analysis of studies on individual consumption of chlorinated drinking water and bladder cancer.* **VILLANUEVA , C; Kogevinas, M; Grimalt, J.;** s.l. : Elsevier, 2003, Epidemiol community health, Vol. 57, págs. 166-173.
11. *Facile in situ synthesis of noble metal nanoparrticles in porous cellulose fibers.* **JUNHUI, T; Kunitake, A; Nakao;** United State : s.n., 2003, págs. 853-861.
12. **OVALLE, S A; Blanco, C.; Hinestroza, J. P.; Combariza, M. Y.;** *Síntesis de nanoparticulas de plata sobre fibras de fique .* 2010. págs. 10-13.
13. *Performance assessment of electrospun nanofibers for filter applications.* **BJORGE, D; Daels, N; Dejans, P; Van Camp, T; al., et;.** s.l. : Elsevier, 2009, págs. 942-948.

14. *Sliver I: its antibacterial properties and mechanism of action.* **LANDSDOWN, A;** s.l. : Wound Care, 2002, Vol. 11, págs. 125-138.
15. *Comparative evaluation of silver-containing antimicrobial dressings and drugs.* **CASTELLANO, J J; Shafii, SM; Ko, F; Donate, G; Wright, TE; Mannari, RJ; al., et;** s.l. : International Wound, 2007, págs. 114-122.
16. *Interaction of silver nitrate with readily identifiable groups: relationship to the antibacterial action of silver ions.* **LIAU, S Y; Read, DC; Pugh, WJ; Furr, JR; Russell, AD.;** s.l. : Appl Microbiol, 1997, Vol. 25, págs. 279-283.
17. *A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on Escherichia coli an Staphylococcus aureus.* **FENG, Q L; Wu, J; Chen, GQ; Cui, FZ; Kim, TN; Kim, JO.;** s.l. : Biomed Mater, 2000, Vol. 52, págs. 662-668.
18. *A historical review of the use of silver in the tratment of burns.* **KLASEN, H J.** s.l. : Burns, 2000, Vol. 30, págs. 1-9.
19. **DICKENSON, CRISTOPHER.** *Filters and Filtration Handbook.* s.l. : Elsevier, 1997. págs. 158-162.
20. **PALMA, RUTH MARIEN, y otros, y otros.** *Análisis de agua para consumo humano.* Bogotá, D.C : Instituto Nacional de Salud, 1999.
21. **MONTGOMERY, DOUGLAS C; Runger , George C;** *Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería.* s.l. : McGraw Hill, 1996.
22. **HIGSON, SÉAMUS;** *Analytical Chemistry.* s.l. : Oxford University Press, 2004. Vol. cap. 7.5.

## BIBLIOGRAFIA

BROOKES, J; Antenucci, J; Hipsey, M; Burch, M; Ashbolt, N; Ferguson, C. *Fate and Transport of pathogens in lakes and resevoirs*. s.l. : Environment International, July de 2004, Vol. 30, págs. 741-759.

Comisión de Regulacion de Agua Potable y Saneamiento Básico. *Normas de Calidad de agua (Resolucion 2115, Decreto 1575)*. Colombia : s.n., 2007.

DICKENSON, CRISTOPHER. *Filters and Filtration Handbook*. s.l. : Elsevier, 1997. págs. 158-162.

FENG, Q L; Wu, J; Chen, GQ; Cui, FZ; Kim, TN; Kim, JO. *A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on Escherichia coli an Staphylococcus aureus*. s.l. : Biomed Mater, 2000, Vol. 52, págs. 662-668.

HAYDON, S; Deletic, A. *Development of a coupled pathogen-hydrologic catchment model*. s.l. : Journal of Hydrology, 2006, Vol. 328, págs. 467-480.

HIGSON, SÉAMUS;. *Analytical Chemistry*. s.l. : Oxford University Press, 2004. Vol. cap. 7.5.

JUNHUI, T; Kunitake, A; Nakao. *Facile in situ synthesis of noble metal nanoparrticles in porous cellulose fibers*. United State : s.n., 2003, págs. 853-861.

LANDSDOWN, A. *Sliver I: its antibacterial properties and mechanism of action*. s.l. : Wound Care, 2002, Vol. 11, págs. 125-138.

LIAU, S Y; Read, DC; Pugh, WJ; Furr, JR; Russell, AD. *Interaction of silver nitrate with readily identifiable groups: relationship to the antibacterial action of silver ions*. s.l. : Appl Microbiol, 1997, Vol. 25, págs. 279-283.

MONTGOMERY, DOUGLAS C; Runger , George C;. *Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería*. s.l. : McGraw Hill, 1996.

OMS - Organizacion Mundial de la Salud. *Guidelines for drinking water quality* . 3er. Ginebra : s.n., 2006, Vol. 1, págs. 3-122.

OVALLE, S A; Blanco, C.; Hinestroza, J. P.; Combariza, M. Y. *Síntesis de nanoparticulas de plata sobre fibras de fique* . 2010. págs. 10-13.

PALMA, RUTH MARIEN, y otros. *Análisis de agua para consumo humano*. Bogotá, D.C : Instituto Nacional de Salud, 1999.

SIMPSON, J; Santodomingo, J; Reasoner, D. *Microbial Source Tracking: State of the Science*. s.l. : Environmental Science & Technology, 2002, Vol. 36, págs. 5279-5288.

USEPA. *Guidance Manual Alternative Disinfectants and Oxidants*. 1999, Vol. 8 págs. 1 –25.

WHITE, G C;. *Handbook of chlorination and alternative disinfectants*. [ed.] John Wiley & sons. s.l. : Wiley- Interscience Publication, 1999. págs. 1153-1202.

## ANEXOS

### Anexo 1. Ecuaciones de determinación del rango para el peso de medio filtrante.

Regla de tres compuesta

La regla de tres compuesta se emplea cuando se relacionan tres o más magnitudes, de modo que a partir de las relaciones establecidas entre las magnitudes conocidas obtenemos la desconocida.

Una regla de tres compuesta se compone de varias reglas de tres simples aplicadas sucesivamente.

Regla de tres compuestas inversas:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C}{X}$$

$$X = \frac{A_1 B_1 C}{A_2 B_2}$$

Tiempo de Residencia: Tiempo promedio en que una sustancia permanece en un medio; se obtiene al dividir la cantidad de la sustancia en el medio entre el flujo de dicha sustancia en ese medio.

$$t_R = \frac{V_{filtro}}{Q}$$

$A_1 = 200 \text{ mL}$        $B_1 = 300 \text{ s}$        $C = 6\text{g}$

$A_2 = 680 \text{ mL}$        $B_2 = 4,5 \text{ s}$        $X = ?$

Resolviendo la ecuación tenemos que el peso es de:

$X = 118 \text{ g}$  de fibra de fique sintetizada.

Dónde:

A<sub>1</sub>: Volumen empleado en la prueba % Remoción vs Cantidad de empaque.

A<sub>2</sub>: Volumen de filtro de 7 in.

B<sub>1</sub>: Tiempo en la prueba de % Remoción vs Cantidad de empaque.

B<sub>2</sub>: Tiempo de residencia en el filtro de 7 in.

C: Cantidad en peso de fibras utilizadas en la prueba % Remoción vs Cantidad de empaque.

## Anexo 2. Datos de los resultados de la etapa experimental.

*Tabla Recopilación de resultados usando agua cruda con CT=2496 UFC/100mL y CS=3104 UFC/100mL.*

Reciclo	w= 120gr, ρ= 0,07 gr/cm		% Remoción		w= 120gr, ρ= 0,07 gr/cm replica		% Remoción	
	CT <sub>f</sub> UFC/100 ml	CS <sub>f</sub> UFC/100 ml	CT	CS	CT <sub>f</sub> UFC/100 ml	CS <sub>f</sub> UFC/100 ml	CT	CS
1	6	776	99,76	75	7	813	99,72	73,81
3	0	480	100	84,54	2	521	99,91	83,22
	w= 120gr, ρ= 0,15 gr/cm		% Remoción		w= 120gr, ρ= 0,15 gr/cm réplica		% Remoción	
	CT <sub>f</sub> UFC/100 ml	CS <sub>f</sub> UFC/100 ml	CT	CS	CT <sub>f</sub> UFC/100 ml	CS <sub>f</sub> UFC/100 ml	CT	CS
1	14	672	99,44	78,35	18	603	99,28	80,57
3	2	312	99,92	89,95	3	297	99,88	90,43

*Recopilación de resultados usando agua cruda con CT0=1160 UFC/100mL y CS0=2400 UFC/100mL.*

Reciclo	w= 180gr, ρ= 0,07 gr/cm		% Remoción		w= 180gr, ρ= 0,07 gr/cm replica		% Remoción	
	CT <sub>f</sub> UFC/100 ml	CS <sub>f</sub> UFC/100 ml	CT	CS	CT <sub>f</sub> UFC/100 ml	CS <sub>f</sub> UFC/100 ml	CT	CS
1	12	402	99,06	83,25	15	467	98,70	80,54
3	4	344	99,65	85,66	1	312	99,91	90,38
	w= 180gr, ρ= 0,15 gr/cm		% Remoción		w= 180gr, ρ= 0,15 gr/cm réplica		% Remoción	
	CT <sub>f</sub> UFC/100 ml	CS <sub>f</sub> UFC/100 ml	CT	CS	CT <sub>f</sub> UFC/100 ml	CS <sub>f</sub> UFC/100 ml	CT	CS
1	16	248	98,62	89,66	13	254	98,88	89,42
3	2	192	99,83	92	2	189	99,83	92,13

### Anexo 3. Análisis de la Varianza para % Remoción CT.

*Tabla de análisis de varianza (ANOVA) para los datos de porcentaje de remoción de coliformes totales.*

Factor Variable	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de cuadrados	F calculado	P-valor
<b>Efectos principales</b>					
A: Peso	0,7353	1	0,7353	38.12	0,0003
B: Densidad	0,0663	1	0,0663	3.44	0,1008
C: Ciclos	1,8700	1	1,8700	96.96	0,0000
<b>Efectos interacciones</b>					
AB	0,0315	1	0,0315	1,63	0,2371
AC	0,0637	1	0,0637	3,31	0,1066
BC	0,3751	1	0,3751	19,45	0,0023
Error	0,1543	8	0,0192		
Total	3,2982	15			

R-cuadrado = 95,3217 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92,2028 por ciento

Error Estándar de Est. = 0,138879

Error absoluto de la media = 0,0760937

Estadístico Durbin-Watson = 2,43193 (P=0,0273)

Autocorrelación residual Lag 1 = -0,218598

#### Anexo 4. Análisis de la Varianza para %Remoción Cs.

*Tabla de análisis de varianza (ANOVA) para los datos de porcentaje de remoción de coliformes Estándar.*

Factor Variable	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de cuadrados	F calculado	p-Valor
<b>Efectos principales</b>					
A: Peso	139,063	1	139,063	45,17	0,0001
B: Densidad	132,883	1	132,883	43,17	0,0002
C: Ciclos	208,153	1	208,153	67,62	0,0000
<b>Efectos interacciones</b>					
AB	0,0264063	1	0,0264063	0,01	0,9285
BC	33,3795	1	33,3795	10,84	0,0110
BC	1,37476	1	1,37476	0,45	0,5228
Error	24,6269	8	24,6269		
Total	539,78	15			

R-cuadrado = 95,4376 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92,396 por ciento

Error Estándar de Est. = 1,75453

Error absoluto de la media = 1,00391

Estadístico Durbin-Watson = 3,08745 (P=0,0155)

Autocorrelación residual Lag 1 = -0,54996

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en %Remoción Cs en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Después pruebe la significación estadística de cada efecto comparando la media al cuadrado contra una estimación del error experimental. En este caso, 4 de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0% de nivel de confianza.

**Anexo 5. Optimización de Respuesta Múltiple para % Remoción CT y % Remoción CS.**

Observado

Respuesta	Mínimo	Máximo
%Remoción CT	98,62	100,0
%Remoción Cs	73,81	92,13

Pronosticado Observado

Fila	% CT	% CS	Conveniencia	Conveniencia
1	99,76	75,0	0,17445	0,304354
2	99,65	85,66	0,816213	0,741425
3	99,44	78,35	0,50348	0,450263
4	99,83	92,0	0,964041	0,956556
5	99,06	83,25	0,473401	0,534716
6	99,92	89,95	0,905195	0,92543
7	100,0	84,54	0,769962	0,779338
8	98,62	89,66	0,555673	0,521365
9	99,72	73,81	0,20451	0,191476
10	99,91	90,38	0,818692	0,934652
11	99,28	80,57	0,508935	0,504965
12	99,83	92,13	0,958514	0,956556
13	98,7	80,54	0,47431	0,372686
14	99,88	90,43	0,907217	0,928615
15	99,91	83,22	0,774586	0,716721
16	98,88	89,42	0,552172	0,616646

Este procedimiento ayuda a determinar la combinación de factores experimentales que simultáneamente optimiza varias respuestas. Hace esto aumentando al máximo una función de conveniencia. Puede determinar varias características de la función de conveniencia en el cuadro de diálogo Opciones del Análisis. Los objetivos para cada una de las respuestas actualmente están determinados como:

% Remoción CT - maximizar

% Remoción Cs – maximizar

La salida también muestra la función de conveniencia evaluada en cada punto en el diseño. Entre los puntos del diseño, se logra una conveniencia máxima en la ejecución 4. Para encontrar la combinación de factores que logran la conveniencia óptima global, seleccionar Optimización del cuadro de diálogo Opciones Tabulares.

### **Anexo 6. Conveniencia Óptima.**

Valor Optimo = 0,963151

Factor	Bajo	Alto	Optimo
Peso	120,0	180,0	167,089
Densidad	0,07	0,15	0,1498
Ciclos	-1,0	1,0	1,0

Respuesta            Óptimo

%Remoción CT     99,8553

%Remoción CS     92,0

Esta tabla muestra la combinación de niveles de factores que aumentan al máximo la función de conveniencia por encima de la región indicada. También muestra la

combinación de los factores en la que se logra la optimización. Utilice el cuadro de diálogo Opciones del Análisis para indicar la región en la que se realizará la optimización.

## Anexo 7. Espectroscopia de absorción atómica.

