

Evaluación de Filtros de Cerámica como Alternativa para Tratamiento de Agua
Potable en Comunidades Rurales



DANIEL FELIPE AMEZQUITA DIAZ
JOSE FELIPE ORDOÑEZ MARTINEZ

Trabajo de Grado Modalidad de Investigación como Requisito Parcial para Optar
al Título de Ingenieros Ambientales

Director

PhD. JAVIER ERNESTO FERNANDEZ MERA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN, CAUCA

2017

Evaluación de Filtros de Cerámica como Alternativa para Tratamiento de Agua

Potable en Comunidades Rurales

DANIEL FELIPE AMEZQUITA DIAZ

JOSE FELIPE ORDOÑEZ MARTINEZ

APROBADO

JAVIER ERNESTO FERNANDEZ MERA

Ingeniero

DIRECTOR

MARIA ELENA ISABEL CASTRO CAICEDO

Ingeniera

JURADO

MONICA ALEXANDRA LUNA IMBACUAN

Ingeniera

JURADO

DEDICATORIA

A mi padre, Víctor Hugo Amézquita, quien me educo bajo los principios de la humildad, lealtad, gratitud y ha sido el ejemplo en mi vida de lo que es un gran hombre, un gran padre y un gran ser humano. A mi madre y abuela, María Emérita Peña, por permanecer a mi lado todos estos años, por formarme en mi infancia con disciplina y llenar mi vida de amor y compañía. A mi segundo padre, Alirio Lesmes Doncel, por ofrecerme su amor incondicional toda la vida, por cada problema del que me ha ayudado a salir y por ser más que padre, un gran amigo. A mis tías y hermanas, Mónica Andrea Lesmes y Claudia Carolina Lesmes, por ser mis más grandes amigas, por mantener su atención en cada paso que doy en mi vida y por ofrecerme su apoyo incondicional. En general, a cada integrante de mi familia, a cada profesor que heredo parte de su conocimiento durante mi formación, y a cada compañero que estuvo a mi lado en este proceso dedico esta meta cumplida.

Daniel Felipe Amézquita Díaz

A Dios por iluminarme en cada momento y llenarme de sabiduría y fortaleza para enfrentar cada obstáculo con la mayor tranquilidad. A mi padre, José Ordoñez quien siempre se esforzó por verme salir adelante hasta sus últimos días y hoy desde el cielo comparte conmigo esta alegría. A mi madre, Nora Martínez quien siempre me guio para ser una persona llena de principios y valores, los cuales se vieron reflejados en el transcurso de mi vida, por ser mi fuerza y mi mayor motivación para cada meta que me propongo. Finalmente, a mis profesores y amigos los cuales me apoyaron durante todo mi proceso de formación.

José Felipe Ordoñez Martínez

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por llenarnos de vida, salud, energía, pasión y por iluminar nuestro camino hasta este gratificante día en el que cumplimos esta meta.

Al Ingeniero Javier Ernesto Fernández Mera, por toda su paciencia y su infinita colaboración, por ser más que un director durante nuestra investigación, fue un maestro que nos permitió experimentar, equivocarnos y aprender más de lo que esperábamos.

A Juan Pablo Paz, por ofrecernos su apoyo y por toda la atención y colaboración que nos prestó para que la investigación fuese posible.

Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental y al Laboratorio de Calidad de la Universidad del Cauca, por facilitarnos el uso de las instalaciones, material y equipos a su cargo para llevar a cabo nuestro estudio.

A el Centro de Estudios Vegetales La Rejoya y más en específico a la Mayordomía por prestarnos el espacio para la ubicación del sistema de estudio y por toda la colaboración y atenciones que nos ofrecieron.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2. JUSTIFICACIÓN	4
3. OBJETIVOS	6
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
4. REVISION DE LITERATURA	7
4.1. AGUA POTABLE.....	7
4.1.1. Características del Agua Potable.....	7
4.1.2. Análisis Microbiológico del Agua	8
4.2. MICROORGANISMOS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA	9
4.2.1. Coliformes Totales	9
4.2.2. Coliformes Fecales	10
4.3. FILTRACIÓN DE AGUA.....	10
4.3.1. Filtro de velas de cerámica	11
5. METODOLOGÍA	13
5.1. TIPO DE ESTUDIO	13
5.2. LOCALIZACIÓN	13
5.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIO	14
5.4. EVALUACIÓN PREVIA	16
5.5. METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO 1	17
5.6. METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO 2.....	18
5.7. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	19
6. PRESENTACION DE RESULTADOS	20
6.1. PRODUCCIÓN DE AGUA.....	20
6.2. CALIDAD DEL AGUA.....	22

6.2.1. Turbiedad.....	22
6.2.2. Color	23
6.2.3. pH	24
6.2.4. Coliformes Totales y Fecales.....	25
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	27
7.1. PRODUCCIÓN DE AGUA.....	27
7.2. CALIDAD DEL AGUA.....	32
7.2.1. Turbiedad.....	32
7.2.2. Color	34
7.2.3. Coliformes Totales	36
7.2.4. Coliformes Fecales	37
8. CONCLUSIONES	39
9. RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFIA	42
ANEXO 1. Producción de agua en el transcurso de 3 horas.....	46
ANEXO 2. Porcentajes de Remoción.	48

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Características físicas del agua potable.....	8
Tabla 2. Características químicas de sustancias presentes en el agua.....	8
Tabla 3. Características microbiológicas del agua potable.	9
Tabla 4. Características Hidráulicas y Físicas del Geotextil NT.....	15
Tabla 5. Resultados de Prueba para Determinación de Dilución Óptima.	17
Tabla 6. Parámetros de calidad del agua evaluados.	19
Tabla 7. Volúmenes promedio de agua producida después de tres horas de filtración.	21
Tabla 8. Valores de Turbiedad obtenidos en los 5 puntos de muestreo.	23
Tabla 9. Valores de Color obtenidos en los 5 puntos de muestreo.....	24
Tabla 10. Valores de pH obtenidos en los 5 puntos de muestreo.....	25
Tabla 11. Valores de organismos coliformes obtenidos en los 5 puntos de muestreo.....	26
Tabla 12. Comparación de Líneas de Regresión por Carrera de Filtración.	28
Tabla 13. Tasas de producción de agua.....	29
Tabla 14. ANOVA Comparación de los interceptos.....	31
Tabla 15. Comparación de interceptos por diferencia mínimas significativas, con 95% de confianza.	31
Tabla 16. Pronósticos de producción de agua para 8 horas y 12 horas.	32
Tabla 17. Resumen de Prueba de Múltiples Rangos para las medidas de Turbiedad por el Método de Duncan.....	34
Tabla 18. Resumen de Prueba de Múltiples Rangos para las medidas de Color por el Método de Duncan.....	35
Tabla 19. Reducción de coliformes en unidades logarítmicas.	37

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Composición de la vela de cerámica.	12
Figura 2. Ubicación Centro de Estudios Vegetales La Rejoya. Popayán, Cauca. .	13
Figura 3. Esquema del montaje del sistema	16
Figura 4. Montaje del sistema de estudio en campo.....	18
Figura 5. Volumen acumulado de agua producida en el transcurso de 3 horas. ...	20
Figura 6. Volumen de agua producida en intervalos de 30 minutos.	21
Figura 7. Gráfico de Líneas de Regresión para los datos de producción de agua en el transcurso de 3 horas.	30
Figura 8. Diagrama de Cajas y Bigotes para los datos de Turbiedad de los 3 sistemas de filtración.	34
Figura 9. Diagrama de Cajas y Bigotes para los datos de Color de los 3 sistemas de filtración.....	36

INTRODUCCIÓN

La necesidad de explorar distintas formas de tratamiento del agua, para que su consumo no genere riesgo en la salud humana, es uno de los aspectos más importantes que se viene manejando durante los últimos años para el desarrollo de comunidades que se ven desabastecidas del servicio de agua potable, que carecen de recursos económicos y técnicos para desarrollar sus propios sistemas de tratamiento. Para este tipo de problema, entonces, la pregunta no es ¿Qué hacer?, sino ¿Cómo?, ¿Con qué recursos?, ¿a qué costo?

Frente a estos problemas surgen los filtros cerámicos como una posible alternativa de agua segura, que, con un bajo costo de implementación, operación y mantenimiento, podrían demostrar que tienen la capacidad de ajustarse a las necesidades de potabilización del agua de las comunidades que más lo requieren, manteniéndose en el margen de las posibilidades económicas de las mismas.

El presente documento contiene los resultados de un trabajo de investigación cuyo objetivo principal fue el análisis comparativo del funcionamiento de los filtros en cerámica con y sin un sistema de pretratamiento, en términos de calidad y cantidad de agua producida.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es un país cuya distribución de población según DANE (2005) proyectada para el año 2017 es del 76,72% en la zona urbana y del 23,8% en la zona rural.

El fenómeno de lo rural en Colombia comprende grandes desbalances frente a lo urbano, en aspectos como son: la atención hospitalaria, acceso vial, infraestructura, educación, agua potable y saneamiento. En particular, el abastecimiento de agua potable presenta grandes diferencias, mientras que en la zona urbana se alcanzó una cobertura de acueducto del 97.16%, en la zona rural fue apenas del 73.34%, para el año 2013 (DNP, 2014).

Para el caso del departamento del Cauca, donde el 39.93% de su población se encuentra establecida en la zona urbana y el 60.08% en zona rural, se tiene que el 21,44% de la población consumió agua para consumo humano sin ningún nivel de riesgo, el 35,52% de la misma, agua con un nivel de riesgo bajo, el 11,69% agua con riesgo medio, el 7,64% agua con riesgo alto, el 2,11% inviable sanitariamente y no reporta información el 21,60% de la población, que son básicamente los municipios de Popayán, su capital, y López (IRCA, 2014).

El índice de riesgo de calidad del agua IRCA (Resolución 2115/07) define que el valor aceptable para el consumo humano de agua oscila entre 0% y 5%, donde no debería de haber riesgo para el ser humano de consumirla y enfermarse, lo cual implica según los datos entregados en los informes de los últimos años, que el agua consumida en zonas rurales a nivel nacional genera riesgos para la salud, ya que muestran como indicador un resultado de 24,3% para el año 2014, valor asociado

a un nivel de riesgo medio, frente al valor entregado para la zona urbana del país de 5,9% en el año 2014, el cual se ve asociado a un nivel de riesgo bajo para contraer enfermedades de origen hídrico (MINSALUD, 2014).

La situación crítica en materia de la calidad del agua que se consume en las zonas rurales del departamento del Cauca, sumada a el alto costo que puede implicar la implementación y mejoramiento de los sistemas abastecedores de agua potable rural, disminuyen la posibilidad de desarrollo de la región, de ahí que resulta muy importante que los habitantes de mayor vulnerabilidad cuenten con un sistema que permita realizar la potabilización del agua de una forma eficiente y económica, que no implique la implementación de infraestructura costosa y que garantice la disminución del porcentaje de morbilidad y mortalidad por enfermedad de origen hídrico.

2. JUSTIFICACIÓN

El decreto 1898 del 23 de noviembre de 2016 emanado por el Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, plantea en su sección 3 el uso de esquemas diferenciales para el aprovisionamiento de agua potable y saneamiento, es decir la adopción de soluciones alternativas en zonas rurales para asegurar la oferta de este servicio y poder atender las necesidades específicas de cada comunidad. Éstas deben ser fáciles de operar, no deben requerir mano de obra especializada, ni involucrar altos costos de mantenimiento, adicionalmente es necesario desarrollar en la comunidad el sentido de la necesidad del servicio que se está implementando. La experiencia muestra que aún los sistemas más simples quedan inoperantes en poco tiempo por la falta de interés que tienen los beneficiarios y responsables por desarrollar las tareas mínimas de mantenimiento requeridas (GUIA DE ORIENTACION EN SANEAMIENTO BASICO).

En respuesta a estas necesidades se desarrollaron los filtros de cerámica, promocionados comercialmente por su alta efectividad en la purificación de agua y por su bajo costo de producción y mantenimiento. Teniendo en cuenta que el costo del sistema completo de filtración por familia o vivienda está entre 0,2 y 0,24 s.m.m.l.v, puede ser una cifra presupuestalmente manejable para las familias, comparado con lo que es necesario invertir para llevar a cabo un plan de mejoramiento de agua rural municipal (STEFANI PURIFICADORES)

Recurrir a una solución individual como medida que garantice un agua con calidad suficiente para bebida y preparación de alimentos puede ser una buena alternativa mientras se logra una solución colectiva que cubra estas necesidades, sin embargo, el desconocimiento de requerimientos de pretratamiento, intervalos de limpieza, tiempo útil de vida y capacidad de producción de agua de cada sistema deja la incertidumbre sobre la viabilidad económica y la eficiencia del proceso.

En esta investigación se planteó entonces el realizar una evaluación y estudio de esta alternativa en campo con agua cruda, implementando 2 sistemas de pretratamiento distintos junto a otro sistema sin pretratamiento, comparando la cantidad de agua producida y el impacto del pretratamiento sobre la calidad del efluente producido.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar, en pruebas de campo con agua cruda, la factibilidad de la utilización de filtros de cerámica como una alternativa para la potabilización de agua en zonas rurales.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar el efecto del sistema de pretratamiento en un filtro cerámico sobre la producción de agua en el tiempo.
- Evaluar el efecto del sistema de pretratamiento en un filtro cerámico sobre la calidad de agua producida.

4. REVISION DE LITERATURA

4.1. AGUA POTABLE

Es aquella que, por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas, es apta para el consumo humano; se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal (Resolución 2115, 2007).

El peligro más común y más difundido relativo al agua potable es el de su contaminación, sea esta directa o indirecta, debido al efecto de aguas servidas, de otros desechos o de las excretas del hombre o de los animales. Si dicha contaminación es reciente y entre los factores que contribuyen a ella se hallan agentes portadores de enfermedades entéricas transmisibles, es posible que estén presentes algunos de los organismos vivos causales de las mismas, Beber agua contaminada o emplearla en la preparación de soluciones puede producir mayor número de casos de infección (OPS, 1987).

4.1.1. Características del Agua Potable

El agua potable no debe contener en ningún caso microorganismos considerados patógenos y debe estar libre de bacterias indicadoras de contaminación fecal (OPS, 1987). No debe contener sustancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en cantidades tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente (Resolución 2115, 2007) (ver Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1. Características físicas del agua potable.

<i>Características Físicas</i>	<i>Expresadas como</i>	<i>Valor Máximo Aceptable</i>
Color Aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT)	2

Fuente: Resolución 2115 del 2007

Tabla 2. Características químicas de sustancias presentes en el agua.

<i>Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana</i>	<i>Expresadas como</i>	<i>Valor máximo aceptable (mg/L)</i>
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO ²⁻	0,1
Nitratos	NO ³⁻	10,0
Fluoruros	F ⁻	1,0

Fuente: Resolución 2115 del 2007

4.1.2. Análisis Microbiológico del Agua

Se define análisis microbiológico a cada uno de los procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para el consumo humano para evaluar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos (Resolución 2115, 2007). En cuanto a microorganismos indicadores, ninguna muestra de agua podrá contener *E.coli* en 100cm³, independientemente del tipo de análisis utilizado. Como prueba complementaria se recomienda utilizar la determinación de microorganismos mesófilos cuyo valor máximo será de 100 UFC/100cm³ (Resolución 2115, 2007) (ver Tabla 3).

Tabla 3. Características microbiológicas del agua potable.

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

Fuente: Resolución 2115 del 2007

4.2. MICROORGANISMOS INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA

Varios organismos patógenos de transmisión fecal-oral pueden estar presentes en el agua cruda (agua natural que no ha sido sometida a proceso de tratamiento para su potabilización), entre ellos bacterias como *Salmonella sp*, *Shigella sp*, coliformes totales y fecales, los cuales han sido encontradas en abastecimientos de aguas. (Ocasio y López, 2004).

Desde hace tiempo, se reconoce que los organismos del grupo coliforme son un buen indicador microbiano de la calidad del agua potable, debido principalmente a que son fáciles de detectar y enumerar en el agua. La presencia de *E. coli* en muestras de agua potable, indica la existencia de fallas en la eficacia de tratamiento de aguas, integridad, sistema de distribución y por tanto es una evidencia de contaminación de diferentes orígenes: suelo, superficies de agua dulce y tracto digestivo (OPS, 1987).

4.2.1. Coliformes Totales

El grupo coliforme se define como todas las bacterias Gram negativas en forma bacilar que fermentan la lactosa a temperatura de 35°C a 37°C, produciendo ácido

y gas (CO₂) en un plazo de 24 horas a 48 horas. Se clasifican como aerobias o anaerobias facultativas, son oxidasa negativa, no forman esporas y presentan actividad enzimática de la β galactosidasa. Es un indicador de contaminación microbiológica del agua para consumo humano. Entre ellos se encuentran los diferentes tipos de *Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Enterobacter* y *Klebsiella*. (Resolución 2115,2007).

4.2.2. Coliformes Fecales

Los coliformes fecales, también denominados coliformes termo tolerantes, llamados así porque soportan temperaturas hasta de 45°C, comprenden un grupo muy reducido de microorganismos los cuales son indicadores de calidad, ya que son de origen fecal. En su mayoría están representados por el microorganismo *E. coli* pero se pueden encontrar, entre otros menos frecuentes, *Citrobacter freundii* y *Klebsiella pneumoniae*, estos últimos hacen parte de los coliformes termo tolerantes, pero su origen se asocia normalmente con la vegetación y solo ocasionalmente aparecen en el intestino (HAYES, 1993).

4.3. FILTRACIÓN DE AGUA

La filtración es el proceso de separar un sólido del líquido en el que está suspendido al hacerlos pasar a través de un medio poroso (filtro) que retiene al sólido y por el cual el líquido puede pasar fácilmente. Se emplea para obtener una mayor clarificación, generalmente se aplica después de la sedimentación para eliminar las sustancias que no salieron del agua durante su decantación. La filtración es una estrategia que se puede aplicar mediante el paso del agua por un lecho filtrante

conformado por diferentes granulometrías de arena y material pétreo, cuyo objetivo es retener sólidos en suspensión que van quedando atascados entre los diferentes espacios libres del medio. La filtración se aplica cuando la cantidad de materias que deben retenerse es grande y la dimensión de las partículas contenidas en el agua es relativamente pequeña, asumiendo una fuente de buena calidad y sin contaminación (Degremont, 1979).

4.3.1. Filtro de velas de cerámica

Los filtros de cerámica para el tratamiento del agua han estado en uso durante varios siglos. Los esfuerzos de venta se dirigen a dispositivos centralizados de tratamiento de agua, pero la mayoría de los filtros cerámicos se fabrican ahora para su uso en los puntos de uso. En los países en desarrollo, estos filtros se hacen a nivel local, a menudo en forma de microempresas autofinanciadas. A menudo tienen la forma de una maceta o un tazón y están impregnados con finas partículas coloidales de plata que actúan como desinfectantes y previenen la proliferación de bacterias en el filtro. El filtro se instala en un recipiente plástico o cerámico de 20 a 30 litros con un pasador. Las pruebas de laboratorio han demostrado que estos dispositivos, si están bien diseñados y fabricados, pueden eliminar o desactivar casi todas las bacterias protozoarias y parásitos. Su eficacia contra los virus es desconocida. La limpieza y el mantenimiento del filtro son críticos, al igual que en la mayoría de otros dispositivos de bajo costo utilizados tratamiento del agua de un grifo, se recomienda adjuntar un programa educativo sobre almacenamiento seguro, limpieza del filtro y otras acciones recomendadas. Las ventajas de los filtros

cerámicos son su facilidad de uso, larga vida (si no se rompen) y su costo relativamente bajo. Las desventajas incluyen la posible recontaminación del agua conservada sin cloro residual y un caudal bajo, generalmente de uno a dos litros por hora (National Academy of Sciences, 2007).

Estas velas están hechas de cerámica con micro-Poros (0,6 micron – 1 micron) que no permiten el paso de partículas suspendidas entre ellas microorganismos. Como se mencionó anteriormente vienen recubiertas con plata coloidal que actúa como bactericida y están rellenas con carbón activado que absorbe contaminantes de origen químico, corrigen olor y sabor (Organización panamericana de la Salud, 2006) (ver Figura 1).

Existen diferentes factores que afectan la eficiencia y el rendimiento del filtro, como por ejemplo las propiedades de la vela cerámica tales como la porosidad y espesor y área de superficial de filtración; aditivos como carbón activado y la plata; u otros factores externos como la calidad del agua a filtrar y la altura del agua por encima de la vela (DIAZ, 2016).

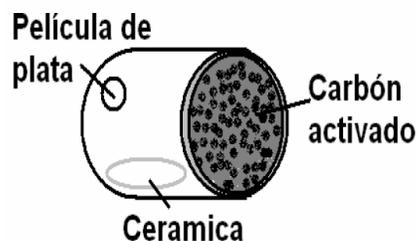


Figura 1. Composición de la vela de cerámica.

Fuente: Organización panamericana de la salud, 2006

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó a escala real en campo.

5.2. LOCALIZACIÓN

El sistema de estudio fue ubicado en el Centro de Estudios Vegetales La Rejoja, el cual se encuentra al noroccidente del municipio de Popayán, vía la vereda La Rejoja, en el departamento del Cauca. El abastecimiento de agua para el estudio se realizó del acueducto La Rejoja, la cual no cuenta con un sistema de tratamiento previo. En este sitio se tomaron las muestras de agua afluyente y del efluente que proporcionaron cada uno de los 3 sistemas de filtración que fueron objeto de estudio.

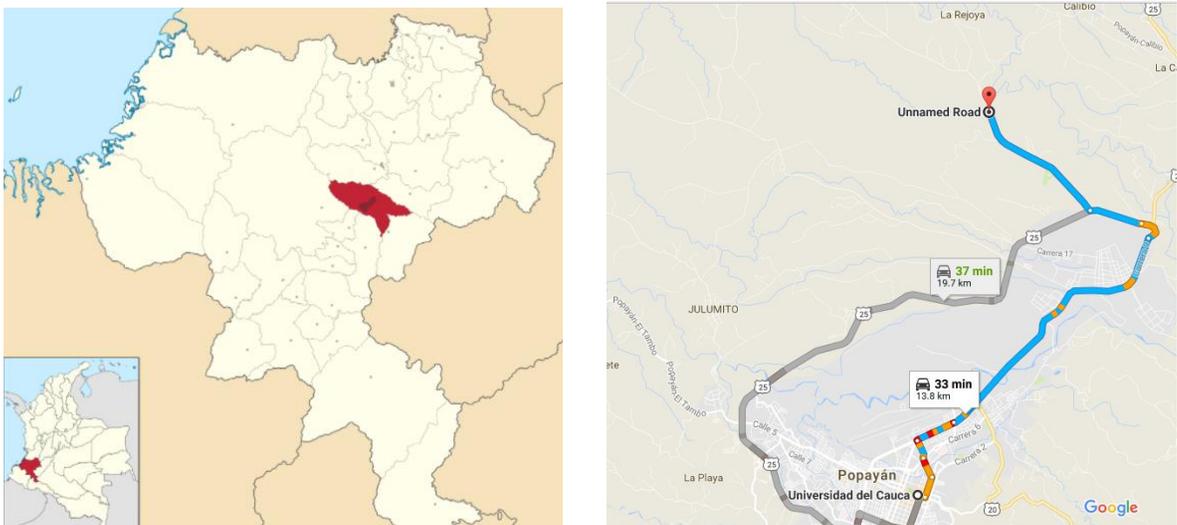


Figura 2. Ubicación Centro de Estudios Vegetales La Rejoja. Popayán, Cauca.

Fuente: Google Maps, 2017

La parte experimental del análisis microbiológico se realizó en el Laboratorio de Calidad ubicado en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, donde se dividió el trabajo semanal en 3 días, para la preparación del medio de cultivo y esterilización del material, filtración por membrana y sembrado, conteo de colonias y desinfección del material, respectivamente.

La parte experimental del análisis fisicoquímico se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental ubicado en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, en el cual se hizo la medición de turbiedad y color a las muestras de agua.

5.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIO

El sistema utilizado para el estudio está formado por 3 filtros cerámicos convencionales, los cuales se componen de una vasija de carga, una vasija de descarga y una pila de cerámica, la cual va instalada en el fondo de la vasija de carga como se muestra en la Figura 3. Cada vasija tiene una capacidad aproximada de 27 litros.

Para dos de los filtros convencionales se les agrego un material a ser evaluado como tratamiento preliminar del afluente y así poder ser comparado con el filtro convencional. Uno de estos materiales fue una capa de grava de río con un diámetro de partícula entre 0,635 cm y 0,317 que corresponde a lo que pasa por el tamiz # $\frac{1}{4}$ y se retiene en el tamiz # 4, el cual se adiciono en la vasija de carga con una cantidad suficiente para cubrir la totalidad de la vela cerámica.

Para el segundo filtro convencional se instaló un cartucho en geotextiles sintéticos no tejidos como dispositivo para el tratamiento preliminar del afluente, para observar al igual que con el filtro que lleva la grava de río, el efecto que este tiene sobre el volumen agua producida en el tiempo y así mismo ver la calidad del efluente. El tercer filtro se instaló sin ningún pretratamiento (blanco) para evaluar comparativamente el desempeño de las unidades.

El tipo de geotextil NT instalado en el cartucho correspondió al mismo utilizado en estudios previos realizados por Pérez y Palechor (2017), y correspondió al NT 1600. Sus características se muestran en la Tabla 4.

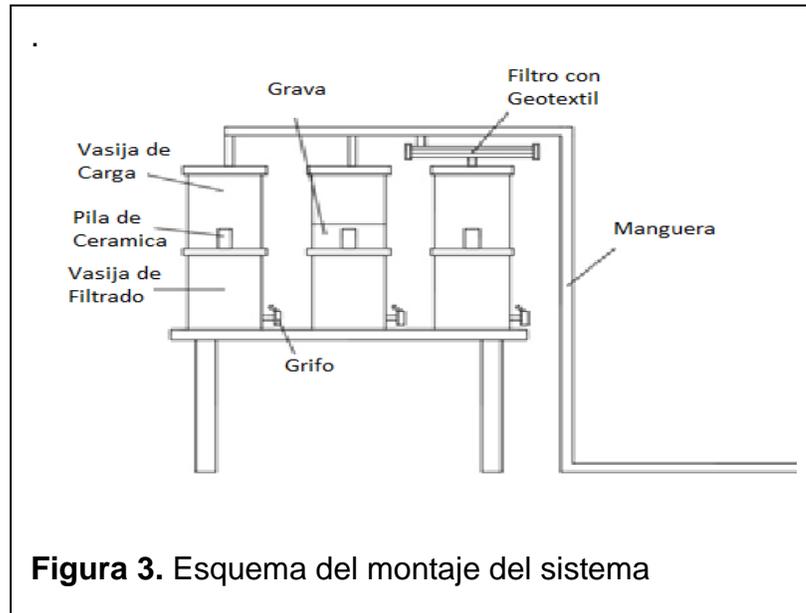
Tabla 4. Características Hidráulicas y Físicas del Geotextil NT.

<i>Parámetro</i>	<i>Propiedad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor Típico</i>
<i>Hidráulicas</i>	Tamaño de abertura aparente	mm (no tamiz)	0,18
	Permeabilidad	cm/s	4400,00
	Permitividad	L/s	2,90
	Tasa de Flujo	L/min/m ²	8109,00
<i>Físicas</i>	Abertura	mm (no tamiz)	1,50

Fuente: Geosistemas PAVCO, 2013

Se decidió reconocer al filtro convencional como filtro 1, al filtro que contenía la grava de río como filtro 2 y al filtro que se alimentaba con el efluente del cartucho con geotextil como filtro 3.

Para alimentar los tres filtros se construyó un dispositivo de conducción del afluente con 3 salidas, el cual fue conectado a un grifo mediante una manguera tal como se muestra en el esquema de la Figura 3.



5.4. EVALUACIÓN PREVIA

Para determinar el volumen útil de almacenamiento de agua y la dilución a usar durante el análisis microbiológico para las muestras del agua afluente fue necesario realizar un dimensionamiento de la pila cerámica y de las vasijas de carga y descarga, las cuales dieron una capacidad de almacenamiento de 27.6 L y 27.3 L respectivamente. Dichos volúmenes solo corresponden para los filtros 1 y 3 ya que para el filtro 2, el cual contiene la grava de río en la vasija de carga, por el espacio que esta ocupa se disminuía el volumen útil de agua a filtrar, dando un valor de capacidad de 20.5 L.

Para determinar la dilución más óptima a usar durante el análisis microbiológico se tomó una muestra del afluente y se le hizo un ensayo donde se hicieron 3 siembras

de la muestra, una de estas sin dilución, una con dilución 10^{-1} y la última con dilución 10^{-2} , cada una con su respectiva replica. Los datos de concentración de unidades formadoras de colonias en 100 mL de muestra para la determinación de la dilución más óptima a usar se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de Prueba para Determinación de Dilución Óptima.
Concentración (UFC/100mL)

<i>Temperatura de Incubación</i>	<i>Dilución 10^0</i>	<i>Dilución 10^{-1}</i>	<i>Dilución 10^{-2}</i>
<i>37°C (C. Totales)</i>	9	620	1000
<i>44,5°C (C. Fecales)</i>	7	470	500

A partir de estos resultados se adopta la dilución 10^{-1} como la dilución más óptima a usar en el análisis microbiológico para las muestras de entrada y efluente del cartucho con geotextil, ya que es la dilución que permitió realizar un conteo más claro y con menor necesidad de recursos de reactivos.

Antes de cada réplica las cerámicas fueron lavadas utilizando agua filtrada producida por los mismos sistemas, realizando un cepillado suave de la superficie de la cerámica. El geotextil fue retirado del cartucho y lavado manualmente con agua filtrada. De igual manera la grava utilizada fue retirada y lavada manualmente.

5.5. METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO 1

Para el desarrollo del objetivo 1 se evaluó el comportamiento de la producción de agua en cada uno de los tres sistemas de filtración, para lo cual después de ser llenadas las vasijas de carga se tomaron medidas de altura de columna de agua en las tres vasijas de descarga cada 30 minutos durante un período de 3 horas en el

durante 7 semanas , obteniendo así para cada filtro 6 datos de alturas de columna de agua, con los cuales teniendo el diámetro de la vasija se podría calcular un volumen de agua producida en cada intervalo de tiempo y la tasa promedio de producción de agua para cada filtro.

5.6. METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO 2.

Para el desarrollo del objetivo 2 se tomaron muestras de agua en 5 puntos del sistema. Un punto fue ubicado en la entrada del agua al sistema, otro en el efluente del cartucho con geotextil y los últimos tres en cada una de las salidas de los filtros a evaluar durante un período de 9 semanas (ver Figura 4).



Figura 4. Montaje del sistema de estudio en campo

Las tomas de muestras se hicieron siguiendo el Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio, estipulado por el artículo 27 del Decreto 1575 de 2007 emanado por el Ministerio de la Protección Social, el cual recomienda, entre varios aspectos, frascos color ámbar, pilas de gel frío y neveras térmicas como el equipo

a usar para la recolección y transporte de las muestras de agua. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que fueron objetivo de medición y análisis, junto con el método de determinación utilizado para cada uno de estos se consignan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de calidad del agua evaluados.

<i>Parámetro</i>	<i>Método</i>
Turbiedad	TP0443 (IDEAM)
Color	206/9-85 (STANDARD METHODS)
pH	TP0080 (IDEAM)
Organismos Coliformes (Filtración por Membrana)	TP0314 (IDEAM)

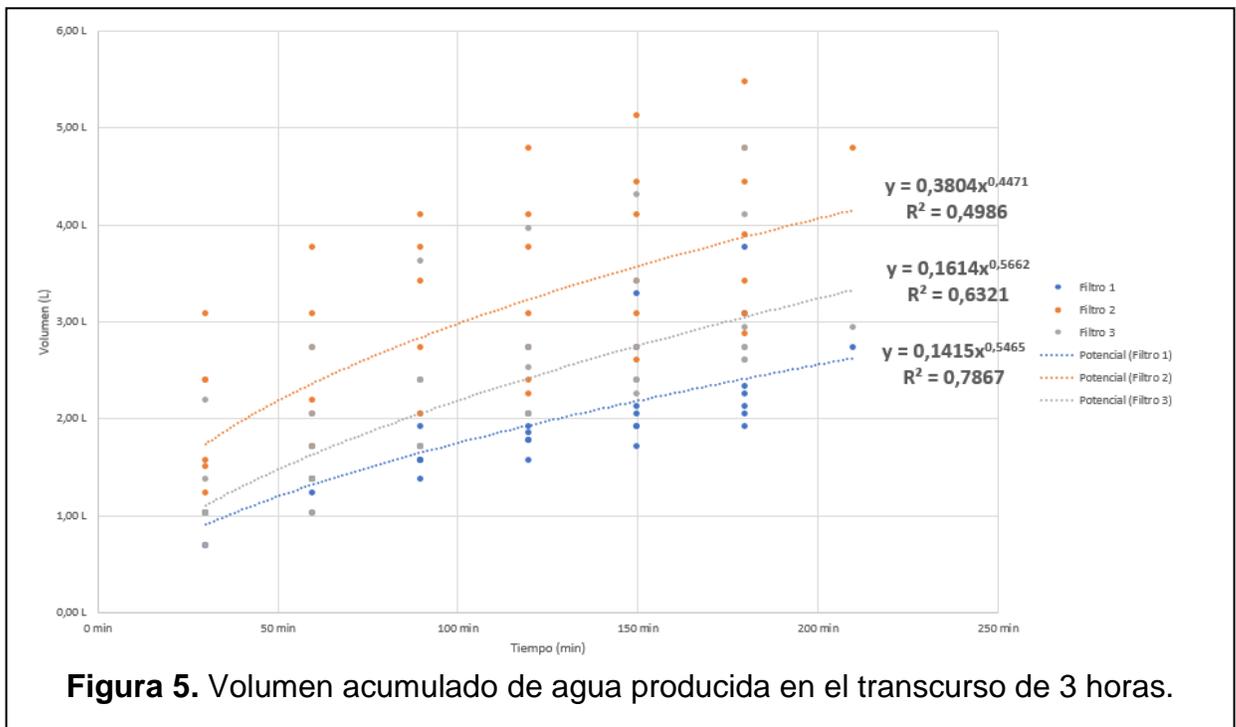
5.7. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Para encontrar si hay diferencias estadísticamente significativas entre los datos de producción y calidad de agua para los 3 filtros se hicieron análisis de varianzas y comparación de líneas de regresión, con el apoyo de los softwares Statgraphics Centurión XVI y Excel 2016.

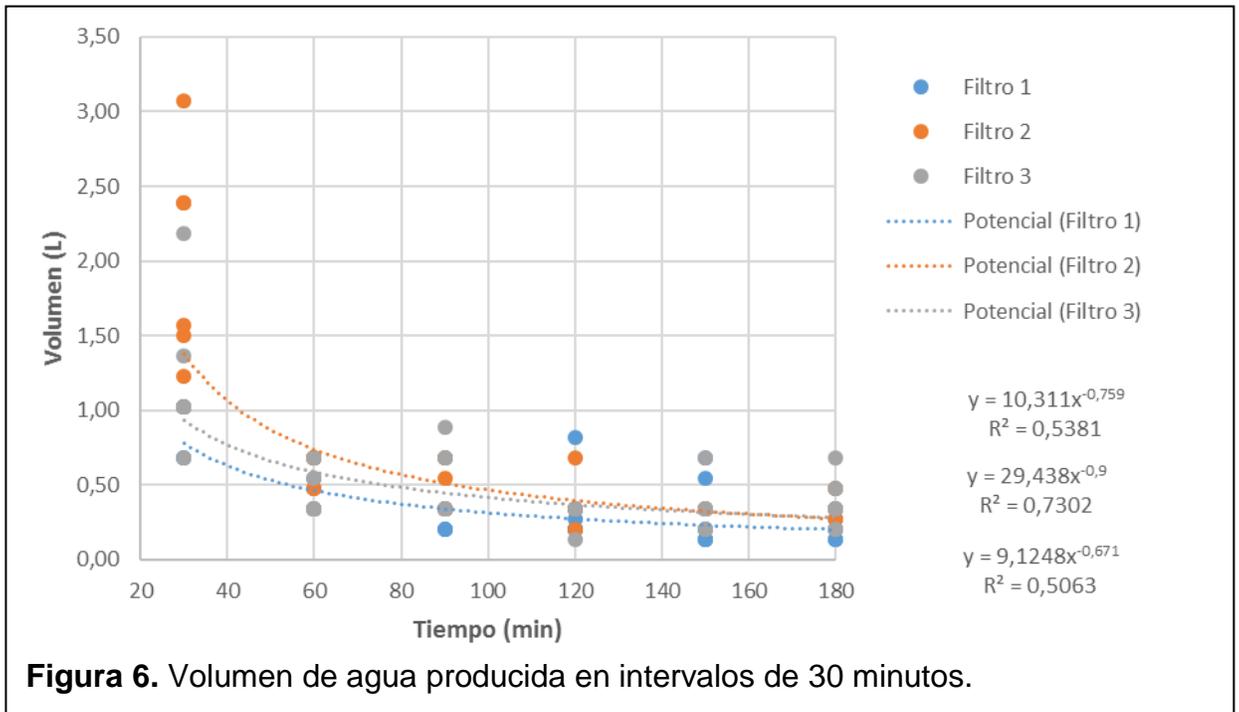
6. PRESENTACION DE RESULTADOS

6.1. PRODUCCIÓN DE AGUA

El comportamiento del volumen de agua producido durante el período de 3 horas se presenta en la figura 5, y los valores promedio alcanzados junto con las estadísticas descriptivas se presentan en la tabla 7. Los datos específicos de altura medida y volúmenes de agua producida se consignan en el anexo 1.



La Figura 5 muestra que el comportamiento del volumen acumulado producido en el tiempo corresponde a líneas de tendencia de tipo potencial para los 3 filtros a lo largo de toda la etapa de investigación en el transcurso de 3 horas, lo cual indica que la producción de agua se va reduciendo con el paso del tiempo.



La Figura 6 muestra que el comportamiento del volumen de agua producida en deltas de tiempo de 30 minutos corresponde a líneas de tendencia de tipo potencial para los 3 filtros. La figura indica que conforme avanzaba la carrera de filtración se disminuía la cantidad de agua producida entre deltas.

Tabla 7. Volúmenes promedio de agua producida después de tres horas de filtración.

<i>Estadístico</i>	<i>Filtro 1</i>	<i>Filtro 2</i>	<i>Filtro 3</i>
Promedio (L)	2,50	3,99	3,21
Desviación Estándar	0,67	0,95	0,87
Máximo valor (L)	3,76	5,46	4,78
Mínimo valor (L)	1,91	2,87	2,6
Número de Datos	7	7	7

6.2. CALIDAD DEL AGUA

En general, las pruebas fisicoquímicas y biológicas que se le realizaron a la entrada y salida de cada unidad en estudio, indicaron que se presenta un mejoramiento en la calidad del agua por reducción en cada uno los parámetros.

En el Anexo 2 se encuentran las tablas con los valores de porcentajes de remoción calculados para los datos de Turbiedad, Color, Coliformes Totales y Coliformes Fecales para cada una de las réplicas realizadas.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las mediciones de turbiedad, color, pH, coliformes totales y coliformes fecales, con sus respectivas observaciones.

6.2.1. Turbiedad

En la Tabla 8 se presentan los datos de Turbiedad obtenidos para los 5 puntos de muestreo. Se puede apreciar el trabajo que ejerce el cartucho con geotextil sobre el agua afluyente en remoción de turbiedad pasando de valores promedio de 3,55 NTU en el afluyente, a 2,66 NTU en el efluente del cartucho, entregando así un valor de porcentaje de remoción de turbiedad promedio del 18,48%.

Los 3 filtros, en general, entregaron valores promedio inferiores a 2 NTU, el cual es el valor máximo permitido por la Resolución 2115 para este parámetro de importancia en agua potable.

Tabla 8. Valores de Turbiedad obtenidos en los 5 puntos de muestreo.

TURBIEDAD (NTU)					
Replica	Entrada	Salida Geotextil	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
1	4,87	-	1,76	1,48	1,60
2	2,50	2,20	1,64	1,09	0,78
3	2,48	2,42	0,81	2,18	0,75
4	2,08	1,70	0,27	1,50	0,25
5	2,61	2,17	0,34	1,78	0,67
6	6,39	3,89	0,74	1,49	0,98
7	3,08	2,53	0,79	1,47	0,69
8	3,50	2,40	0,62	2,20	0,73
9	4,44	4,00	0,85	1,00	0,90
Promedio	3,55	2,66	0,87	1,58	0,82
D. Estándar	1,42	0,83	0,51	0,42	0,36
Mínimo	2,08	1,70	0,27	1,00	0,25
Máximo	6,39	4,00	1,76	2,20	1,60
Rango	4,31	2,3	1,49	1,2	1,35

6.2.2. Color

La Tabla 9 presenta los datos de Color obtenidos para los 5 puntos de muestreo.

En general se puede apreciar que para los 3 filtros el agua efluente presento valores de color inferiores al límite máximo permitido, siendo este de 15 UPC.

El cartucho con geotextil presento porcentajes de remoción de Color promedios de 16,26%, pasando de un valor promedio de 31,89 UPC en el afluente, a 25,13 UPC en el efluente del cartucho.

Tabla 9. Valores de Color obtenidos en los 5 puntos de muestreo.

<i>COLOR (UPC)</i>					
<i>Replica</i>	<i>Entrada</i>	<i>Salida Geotextil</i>	<i>Filtro 1</i>	<i>Filtro 2</i>	<i>Filtro 3</i>
1	41,00	-	13,00	1,00	7,00
2	27,00	25,00	8,00	4,00	3,00
3	19,00	16,00	0,00	12,00	0,00
4	23,00	21,00	0,00	16,00	0,00
5	27,00	26,00	1,00	24,00	4,00
6	52,00	37,00	6,00	13,00	8,00
7	35,00	25,00	3,00	10,00	4,00
8	25,00	21,00	1,00	19,00	9,00
9	38,00	30,00	5,00	12,00	6,00
Promedio	31,89	25,13	4,11	12,33	4,56
D. Estándar	10,46	6,36	4,37	7,05	3,24
Mínimo	19	16	0	1	0
Máximo	52	37	13	24	9
Rango	33	21	13	23	9

6.2.3. pH

El pH en esta investigación fue tomado como un parámetro fisicoquímico de control y de referencia en caso de alguna irregularidad de difícil explicación en el resto de parámetros medidos.

En la Tabla 10 se presentan los valores de pH obtenidos para los 5 puntos de muestreo durante las 9 semanas de muestreo.

En este caso no hubo ninguna anomalía en este parámetro durante la etapa de muestreo y en promedio, para los 5 puntos de muestreo, se obtuvieron valores de pH comprendidos en el rango de las 8,0 a las 9,0 unidades de pH.

Tabla 10. Valores de pH obtenidos en los 5 puntos de muestreo.

<i>pH</i>					
<i>Replica</i>	<i>Entrada</i>	<i>Salida Geotextil</i>	<i>Filtro 1</i>	<i>Filtro 2</i>	<i>Filtro 3</i>
1	8,95	8,52	8,31	8,43	8,46
2	8,38	8,90	8,31	8,90	9,20
3	8,74	8,63	9,06	9,14	9,38
4	8,63	8,20	8,83	8,38	9,12
5	8,29	8,95	8,78	8,46	8,13
6	8,08	8,77	8,70	8,77	8,34
7	7,97	7,89	7,58	8,38	8,60
8	7,95	8,18	7,76	8,77	8,64
9	7,91	7,84	8,59	8,82	8,69
Mínimo	7,91	7,84	7,58	8,38	8,13
Máximo	8,95	8,95	9,06	9,14	9,38
Rango	1,04	1,11	1,48	0,76	1,25

6.2.4. Coliformes Totales y Fecales

La Tabla 11 contiene los valores de Coliformes Totales y Coliformes Fecales obtenidos para los 5 puntos de muestreo.

Si bien no se cumple con lo estipulado por la Resolución 2115 de que en agua potable no se permite la presencia de organismos coliformes, resulta importante resaltar el eficiente trabajo de los filtros en la remoción de estos microorganismos, para un afluente con valor promedio de 4055 UFC/100mL en coliformes totales y un valor promedio de 1225 UFC/100mL en coliformes fecales.

Otro aspecto importante a resaltar es el trabajo que ejerce el cartucho con geotextil en la remoción de organismos coliformes, presentando un porcentaje de remoción promedio de 15,41% en Coliformes Totales, y de 43,02% en Coliformes Fecales, las cuales equivalen a reducciones de 0,08 y 0,25 unidades logarítmicas respectivamente.

Tabla 11. Valores de organismos coliformes obtenidos en los 5 puntos de muestreo

<i>Replica</i>	<i>Coliformes Totales (UFC/100mL)</i>					<i>Coliformes Fecales (UFC/100mL)</i>				
	<i>Entrada</i>	<i>Salida Geotextil</i>	<i>Filtro 1</i>	<i>Filtro 2</i>	<i>Filtro 3</i>	<i>Entrada</i>	<i>Salida Geotextil</i>	<i>Filtro 1</i>	<i>Filtro 2</i>	<i>Filtro 3</i>
1	3115	3110	10	23	14	3030	330	15	11	8
2	3275	3020	11	7	19	3140	1885	7	5	12
3	3890	3490	18	47	51	3275	3085	3	27	16
4	4100	3600	7	43	12	165	105	4	16	6
5	3200	2125	4	88	2	155	90	3	14	0
6	4740	4620	35	61	54	95	65	4	6	7
7	4640	3425	18	17	70	130	65	5	7	2
8	4640	4040	31	47	33	315	45	1	6	4
9	4900	3440	43	24	50	725	620	6	6	3
Promedio	4055	3430	19,3	39,2	33,7	1225	698	5,1	10,7	6,1
D. Estándar	717	688	13,6	24,9	23,4	1455	1072	4,1	7,3	4,9
Mínimo	3115	2125	3,5	6,5	2	95	45	1	4,5	0
Máximo	4900	4620	43	87,5	70	3275	3085	15	27	15,5
Rango	1785	2495	39,5	81	68	3180	3040	14	22,5	15,5

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1. PRODUCCIÓN DE AGUA

La tabla 12 resume los resultados de una comparación de líneas de regresión para los datos de producción de agua en el tiempo, generadas para cada una de las carreras de filtración.

Esta tabla permite evaluar la significancia estadística de los resultados obtenidos en cada modelo de regresión. Debido a que el valor-P tanto para las pendientes como para los interceptos, en todas las carreras de filtración es menor que 0,05, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las pendientes y los interceptos para cada carrera de filtración con un nivel de confianza del 99%. Esto indica que la tasa de producción de agua, la cual está representada por la pendiente de la recta, es diferente en cada filtro y que el grado inicial de obstrucción del filtro es diferente.

Comprendiendo al intercepto como el grado de acumulación de lodo en el filtro, esta diferencia indica que el filtro 2 correspondiente al filtro que contiene la grava es el que pudo producir mayor volumen de agua en un menor tiempo, en comparación con los otros filtros.

Tabla 12. Comparación de Líneas de Regresión por Carrera de Filtración.

<i>Carrera</i>	<i>r2</i>	<i>Filtro</i>	<i>Intercepto</i>			<i>Pendiente</i>		
			<i>b</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>m</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
1	99,53%	1	0,524667			0,0139714		
		2	2,71067	739,67	0,0000	0,0159143	11,28	0,0017
		3	0,474667			0,0198762		
2	99,40%	1	0,522			0,0104095		
		2	2,00333	647,6	0,0000	0,014	7,18	0,0089
		3	0,745333			0,0103619		
3	98,88%	1	0,87			0,00819048		
		2	1,202	280,02	0,0000	0,015219	18,61	0,0002
		3	1,79667			0,0171429		
4	99,57%	1	0,895333			0,00698095		
		2	0,936667	223,76	0,0000	0,012	54,21	0,0000
		3	0,683333			0,011381		
5	97,38%	1	0,534667			0,00801905		
		2	0,871333	44,96	0,0000	0,0115429	7,02	0,0096
		3	0,336667			0,013381		
6	98,18%	1	0,478667			0,0183143		
		2	2,11667	137,03	0,0000	0,015619	11,26	0,0018
		3	1,332			0,00955238		
7	99,58%	1	0,918667			0,00664762		
		2	1,27333	500,96	0,0000	0,0120476	50,53	0,0000
		3	0,683333			0,011381		

Las pendientes obtenidas son la tasa de producción de agua que se presentó en cada replica realizada. Dichas tasas de producción vienen en unidades de litros por minuto, con lo que al hacer la conversión a litros por hora podemos comparar con la literatura. Dichas conversiones se consignan en la tabla 13.

Tabla 13. Tasas de producción de agua

<i>Carrera de Filtración</i>	<i>Tasa de producción (L/h)</i>		
	<i>Filtro 1</i>	<i>Filtro 2</i>	<i>Filtro 3</i>
1	0,84	0,95	1,19
2	0,62	0,84	0,62
3	0,49	0,91	1,03
4	0,42	0,72	0,68
5	0,48	0,69	0,80
6	1,10	0,94	0,57
7	0,40	0,72	0,68

Las tasas de producción de agua están en el rango de 0,4 L/h a 1,19 L/h tal como se muestra en la tabla. Estos resultados son comparables con lo reportado por la National Academic of Science (2007) quienes indican que las tasas de producción de agua para los filtros cerámicos están del orden de 1 a 2 L/h.

De igual manera la empresa CERAMICAS STEFANI informa que dichas tasas de producción se ven afectadas por múltiples factores como la porosidad del filtro, la calidad del agua a filtrar, la altura de columna de agua sobre la pila cerámica, el espesor y área superficial de filtración, el tipo de material filtrante dentro de la pila cerámica, entre otros.

La Figura 7 muestra las líneas de tendencia para la totalidad de los datos de producción de agua en el tiempo

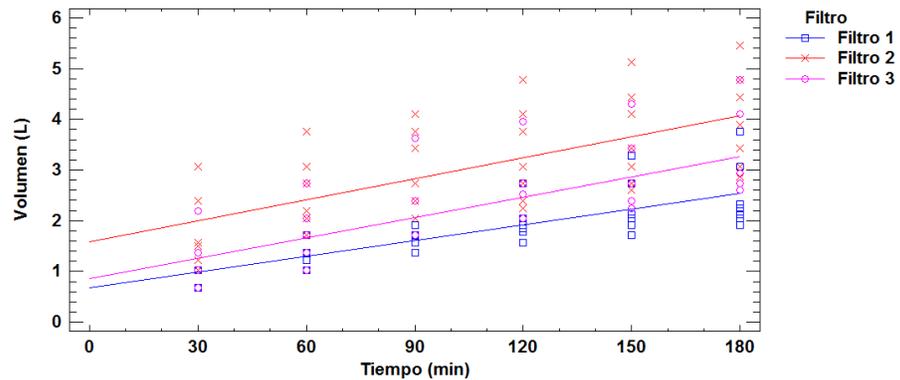


Figura 7. Gráfico de Líneas de Regresión para los datos de producción de agua en el transcurso de 3 horas.

Para determinar si se presentaron diferencias entre los interceptos generados en cada carrera de filtración se realizó una prueba de anova que indicó que existen diferencias significativas $P=0,0093$ con una confiabilidad del 95% (Tabla 14) y una comparación de pos anova, utilizando el procedimiento de Diferencias Mínimas Significativas, que permitió indicar cuales interceptos o grado de obstrucción son iguales y cuales diferentes. Los resultados indican que, con una confiabilidad del 95%, los filtros 1 y 3 son iguales, mientras que el filtro 2 es diferente (tabla 15). Al presentar un mayor promedio en valor del intercepto, indicando que la grava colocada está generando un efecto positivo sobre la obstrucción de la cerámica, la cual mantiene un menor grado de obstrucción, comparada con las otras dos opciones evaluadas.

Tabla 14. ANOVA Comparación de los interceptos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	3,23388	2	1,61694	6,13	0,0093
Intra grupos	4,7463	18	0,263683		
Total (Corr.)	7,98018	20			

Tabla 15. Comparación de interceptos por diferencia mínimas significativas, con 95% de confianza.

<i>Col_1</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1	7	0,677714	X
3	7	0,864572	X
2	7	1,58771	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2	*	-0,91	0,576658
1 - 3		-0,186857	0,576658
2 - 3	*	0,723142	0,576658

* indica una diferencia significativa.

La Tabla 16 contienen los pronósticos de volumen potencial de producción para cada filtro, al cabo de 8 horas y 12 horas de haber iniciado el proceso de filtración, tal como se puede observar en la tabla los volúmenes que podrían ser producidos son bajos, si se considera que una familia compuesta por 4 personas y con una dotación de 120 L/hab*d requerirá de un volumen de aproximadamente 480L/d, esto indica que los volúmenes producidos solo representan el 1,5% para 8 horas y el 2% para 12 horas lo que restringiría su utilización o aprovechamiento para propósitos como la preparación de alimentos y la bebida, aunque se debe considerar la calidad del agua. Otras actividades como el aseo personal y de la vivienda difícilmente podrán ser cubiertas por este tipo de sistemas de tratamiento.

Tabla 16. Pronósticos de producción de agua para 8 horas y 12 horas.

	8 Horas		12 Horas	
	<i>Lim. Inferior (L)</i>	<i>Lim. Superior (L)</i>	<i>Lim. Inferior (L)</i>	<i>Lim. Superior (L)</i>
FILTRO 1	6,0	7,0	9,0	10,0
FILTRO 2	8,0	9,0	11,0	12,0
FILTRO 3	7,0	8,0	11,0	12,0

7.2. CALIDAD DEL AGUA

7.2.1. Turbiedad

Los resultados permiten apreciar que el afluente presento alta variabilidad en su valor de turbiedad y que un porcentaje alto de estos se encuentran concentrados en el intervalo de 3 NTU a 7 NTU, en comparación con los datos obtenidos para los efluentes de los 3 filtros, en los que se aprecia que aproximadamente el 100% de estos no superan el valor de 2 NTU.

También se puede observar el trabajo que el cartucho con geotextil ejerció sobre el afluente, no solo disminuyendo los valores de turbiedad en el agua, sino también controlando la variabilidad de estos, haciendo que se obtuvieran resultados concentrados aproximadamente entre 2 NTU a 4 NTU.

Para establecer si entre los filtros se presentó un comportamiento similar o diferente en la remoción de turbiedad, se realizó un análisis de varianza a los datos arrojados por estos. El valor -P obtenido fue de 0,0015, el cual siendo menor al valor $\alpha=0,05$ indica que hay diferencias estadísticamente significativas en por lo menos uno de los resultados obtenidos por uno de los filtros con respecto a los demás.

Al haber encontrado que por lo menos uno de los filtros se comportó diferente a los demás en remoción de turbiedad es necesario identificar cual o cuales fueron los filtros que tuvieron diferencias estadísticamente significativas. Para esto se realizó la Prueba de Múltiples Rangos por el Método de Duncan, la cual realiza una comparación de pares de datos con un nivel de confianza del 95,0% e identifica cuál de los tratamientos es estadísticamente diferente a los demás.

La Tabla 17 presenta el resumen de esta prueba aplicada para los datos de turbiedad, donde se puede observar en la columna de “Grupos Homogéneos” los Filtros que tuvieron resultados estadísticamente parecidos mediante la alineación de las X.

Esta Tabla indica entonces que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los datos de turbiedad del Filtro 1 y el Filtro 3, sin embargo, también indica que los resultados del Filtro 2 fueron diferentes de los demás filtros. En este sentido, ya que los filtros 1 y 3 son iguales, y que el 2 fue diferente, entonces considerando los valores promedio alcanzados, se puede asegurar que el filtro con gravas presenta un comportamiento diferencial, en el cual las gravas están generando una menor remoción, lo cual podría deberse a la poca posibilidad del lavado que sufre la grava dentro de la unidad y al cambio en tamaño de partícula que puede estar sufriendo los sólidos retenidos debido a posible desprendimiento de los mismos.

Tabla 17. Resumen de Prueba de Múltiples Rangos para las medidas de Turbiedad por el Método de Duncan

<i>Turbiedad</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Filtro 3	9	0,816667	X
Filtro 1	9	0,868889	X
Filtro 2	9	1,57667	X

La Figura 8 permite visualizar este hecho ya que todos los diagramas de cajas y bigotes de los 3 filtros no se encuentran aproximadamente alineados bajo un mismo rango de valores de turbiedad, además se puede observar como la variabilidad de los datos de turbiedad del filtro 2 fue mayor en comparación con el filtro 1 y el filtro 3, siendo este último el que presento menor variabilidad.

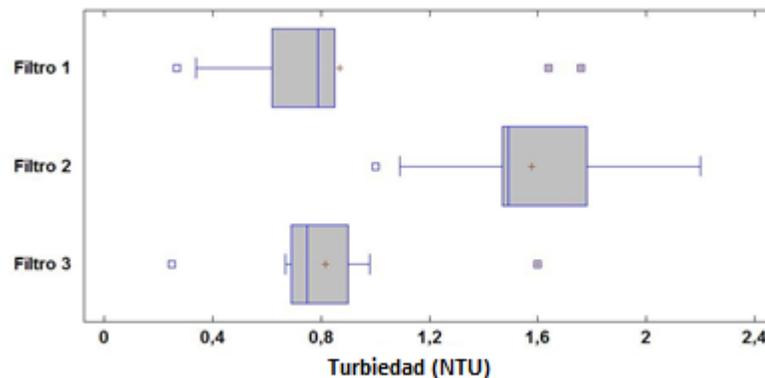


Figura 8. Diagrama de Cajas y Bigotes para los datos de Turbiedad de los 3 sistemas de filtración.

7.2.2. Color

Se puede apreciar como la variabilidad de los datos de color en la entrada fue alta en comparación con la obtenida por la salida del cartucho con el geotextil que

además de haber disminuido los valores de color en las muestras también disminuyó su variabilidad.

Los 3 filtros presentaron un comportamiento similar al reducir en mayor escala los valores de Color y disminuir la variabilidad de estos.

Los resultados del análisis de Varianza indican que por lo menos uno de los filtros se comportó significativamente diferente con respecto a los otros, ya que el valor - P de 0,0034, es menor al de $\alpha=0,05$, con lo que se rechaza la hipótesis de que el tratamiento con los 3 filtros fue igual.

La Prueba de Múltiples Rangos presentada en la Tabla 18 permite identificar que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los datos de Color del Filtro 1 y el Filtro 3, pero si se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre los datos del Filtro 2 y los Filtros 1 y 3.

Tabla 18. Resumen de Prueba de Múltiples Rangos para las medidas de Color por el Método de Duncan.

Color	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Filtro 1	9	4,11111	X
Filtro 3	9	4,55556	X
Filtro 2	9	12,3333	X

Este hecho se puede percibir al analizar la Figura 9, donde se puede observar claramente como más del 75% de los valores de Color obtenidos en el Filtro 2 fueron superiores a los valores que entregó el Filtro 3, y que aproximadamente el 50% de estos fueron de igual manera superiores a los datos obtenidos en el Filtro 1.

Es de indicar que la remoción de color aparente es debida a la remoción de partículas en suspensión, o sea que está asociada a la remoción de turbiedad.

Entonces se puede concluir que, al igual que en el caso de la turbiedad, los filtros 1 y 3 tuvieron un comportamiento similar, a diferencia del filtro con gravas, el cual generó limitaciones en la remoción de color.

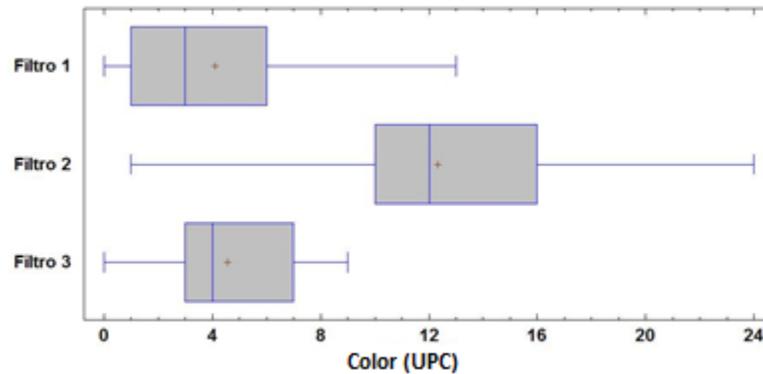


Figura 9. Diagrama de Cajas y Bigotes para los datos de Color de los 3 sistemas de filtración

7.2.3. Coliformes Totales

Los resultados obtenidos demuestran una alta reducción de coliformes totales y un alto control de la variabilidad de la concentración de estos organismos en el efluente. Se puede observar en la tabla 11 la concentración de coliformes totales es alta en el afluente y posee una alta variabilidad, sin embargo, al analizar el comportamiento del cartucho de geotextil logra generar una disminución en la concentración de microorganismos y reduce la variabilidad de los mismos a la entrada del filtro de cerámica.

El análisis de varianza para los datos de concentración de coliformes totales deja como resultado un valor -P de 0,1458, siendo este un valor superior al de $\alpha=0,05$.

Esto significa que no hay diferencias estadísticamente significativas en el tratamiento que ejercieron los 3 filtros en remoción de coliformes totales.

La tabla 19 muestra las unidades logarítmicas que logro remover cada uno de los filtros respecto a la concentración de organismos coliformes, además indica la remoción que efectuó el cartucho con geotextil al afluente. Tenemos entonces que para coliformes totales los 3 filtros lograron remover en promedio cantidades iguales y superiores a 2 unidades logarítmicas.

Tabla 19. Reducción de coliformes en unidades logarítmicas.

<i>Replica</i>	<i>COLIFORMES TOTALES</i>				<i>COLIFORMES FECALES</i>			
	<i>S.G.</i>	<i>FILTRO 1</i>	<i>FILTRO 2</i>	<i>FILTRO 3</i>	<i>S.G.</i>	<i>FILTRO 1</i>	<i>FILTRO 2</i>	<i>FILTRO 3</i>
1	0,0007	2,49	2,13	2,35	0,96	2,31	2,44	1,62
2	0,0352	2,47	2,70	2,20	0,22	2,65	2,84	2,21
3	0,0471	2,35	1,92	1,84	0,03	3,04	2,08	2,30
4	0,0565	2,77	1,98	2,50	0,20	1,67	1,01	1,28
5	0,1778	2,96	1,56	3,03	0,24	1,79	1,04	1,95
6	0,0111	2,14	1,89	1,93	0,16	1,38	1,20	1,00
7	0,1319	2,42	2,45	1,69	0,30	1,46	1,27	1,51
8	0,0601	2,18	2,00	2,09	0,85	2,50	1,76	1,11
9	0,1536	2,06	2,32	1,84	0,07	2,08	2,12	2,32
PROMEDIO	0,0728	2,32	2,01	2,01	0,24	2,38	2,06	2,05

7.2.4. Coliformes Fecales

Para este tipo de organismos se puede evidenciar la alta variabilidad de la concentración que se encontró de estos en el afluente, a comparación del efluente producido por el cartucho con geotextil, el cual no solo controló la variabilidad de esta concentración, sino que también disminuyó su valor de forma considerable.

La tabla 19 muestra que los 3 filtros lograron valores de remoción de coliformes fecales del orden de 2 unidades logarítmicas. También es importante resaltar que el cartucho con geotextil tuvo un mejor desempeño en la remoción de este parámetro en comparación a la remoción que presento de coliformes totales.

El análisis de varianza arrojó como resultado un valor -P de 0,1037, el cual es un valor mayor al de $\alpha=0,05$. Al igual que en el caso anterior con el análisis de varianza para la concentración de coliformes totales no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos que ofrecen los 3 filtros en remoción de coliformes fecales en el agua. Esto también se puede evidenciar en el rango de concentraciones que se encontraron los datos, estando estos comprendidos entre 0 UFC/100 mL y 15 UCF/100 mL aproximadamente.

8. CONCLUSIONES

- Se encontró que la producción de agua en los filtros 1 y 3 son iguales debido a sus interceptos o grado de obstrucción mientras que el filtro 2 es diferente al presentar un mayor promedio en el valor del intercepto, indicando que la grava utilizada como sistema de pretratamiento permite mantener la cerámica del filtro con un menor grado de obstrucción que las otras opciones estudiadas.
- Se determinó que los volúmenes de agua producidos por los sistemas de tratamiento son bajos lo cual restringiría su utilización para propósitos como la preparación de alimentos y la bebida, aunque se debe considerar la calidad del agua. Otras actividades como el aseo personal y de la vivienda difícilmente podrán ser cubiertas por este tipo de sistemas de tratamiento.
- El estudio indicó que el filtro 1 y 3 (sin pretratamiento y con geotextil respectivamente) no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los datos de turbiedad. El filtro 2 presenta diferencias con respecto de los otros dos filtros probablemente debido a que la grava podría estar generando una menor remoción.
- Se observó que el filtro 1 y 3 no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los datos de color aparente, sin embargo, en el filtro 2 si se presentaron estas diferencias debido a la presencia de partículas en suspensión la cual está asociada a la turbiedad, lo que indica que la grava está generando limitaciones en la remoción.

- Se determinó que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos que ofrecen los 3 filtros en la remoción de coliformes fecales y coliformes totales.

9. RECOMENDACIONES

- Aunque los resultados obtenidos en este trabajo de grado estaban dentro de los parámetros esperados, se recomienda estudiar la utilización de un sistema de control de flujo del agua para la alimentación de los filtros en cerámica con tratamiento preliminar.
- Para próximos estudios de investigación de sistemas de pretratamiento alternativos para filtros en cerámica se recomienda explorar la utilización de un cartucho similar al usado en este trabajo, pero reemplazando el geotextil no tejido por la grava de río como material filtrante, para así poder monitorear la calidad del efluente producido por este.
- Se recomienda para próximos estudios analizar las características químicas del efluente producido por un sistema de filtración en cerámica convencional comparado con uno con sistema de tratamiento preliminar.
- Al observar que persiste la contaminación en el efluente en los parámetros de coliformes totales y fecales, se recomienda la implementación de técnicas de desinfección como la dosificación con cloro o tratamiento con temperatura y así poder obtener agua apta para consumo humano en comunidades rurales.

BIBLIOGRAFIA

- CERAMICASTEFANI, Purificadores [En Línea]
<http://www.ceramicastefani.com.br/espanhol/acessorio-stefani/acessorio/1/vela-tradicional>.
- DEGREMONT. 1979, Manual Técnico del Agua, [En Línea]
<http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/consumo.pdf> [Consultado: 22 de Octubre del 2017].
- DIAZ, (2016), “Evaluación de la eficiencia de los filtros de doble vela cerámica impregnados con plata coloidal, implementados por la gobernación de Nariño, el plan departamental de agua pap-pda, en la vereda el Motilón, corregimiento el encano, municipio de pasto”, Universidad del Cauca, Popayán.
- DNP, Subdirección de Agua y Saneamiento, (2014) [En Línea]
https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Vivienda%20Agua%20y%20Desarrollo%20Urbano/Agua/Documentos_sectoriales/1_z_2014_Art%C3%83%C2%ADculo_DNP_Evolucion_coberturas_servicios_AA_1985_2013.pdf
[Consultado: 14 de Febrero del 2017].
- HAYES, 1993, Microbiología e Higiene de los Alimentos, ACRIBIA, Zaragoza España.

- LERMA, D, Filtros cerámicos, una alternativa de agua segura, [En Línea] <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2710/6281683L616.pdf;jsessionid=8E3473DBD63794E49E864587BDD4B90F?sequence=1> [Consultado: 22 de Octubre del 2017].
- MINISTERÍO DE LA PROTECCION SOCIAL, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007, Resolución 2115. 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.
- MINSALUD, Subdirección de Salud Ambiental, (2013) [En Línea] <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/informe-nacional-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano-ano-2013-con-base-en-el-irca.pdf> [Consultado: 12 de Febrero del 2017].
- MINSALUD, Subdirección de Salud Ambiental, (2014) [En Línea] <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/informe-inca-2014.pdf> [Consultado: 12 de Febrero del 2017].
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, (2007), Global Health and Education Foundation, [En Línea] <http://www.koshland-science->

[museum.org/water/html/fr/Treatment/Filtration-Systems-technologies.html#tech5](http://www.unep.org/museum.org/water/html/fr/Treatment/Filtration-Systems-technologies.html#tech5) [Consultado: 22 de Octubre del 2017].

- OCASIO, N Y LOPEZ, M, (2004), El uso del Cloro en la Desinfección del Agua, [En Línea] http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/uso_cloro.pdf [Consultado: 22 de Octubre del 2017].
- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, (1987). “Guías para la calidad del agua potable, Volumen 2, criterios relativos a la salud y otra información base”. Organización Mundial de la Salud, Publicación Científica N°506 Washington D.C.
- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, (2006), “Filtro de velas, manual de construcción, uso y mantenimiento” Organización Mundial de la Salud, Bogotá D.C.
- PEREZ Y PALECHOR, (2017), “Evaluación de un cartucho en geotextiles sintéticos no tejidos (NT) para el pre-tratamiento de agua cruda”, Universidad del Cauca, Popayán
- Salvinelli C., Elmore C., Reidmeyer M., Drake D., Ahmad K, (2016), Characterization of the relationship between ceramic pot filter water

production and turbidity in source water, University of Missouri-Kansas City,
Approved for public release.

- Simonis J.J., Basson A.K., (2012), Manufacturing a low-cost ceramic water filter and filter system for the elimination of common pathogenic bacteria, Department of Biochemistry and Microbiology, University of Zululand, Approved for public release.
- SIVICAP, (2015) [En Línea] <https://www.datos.gov.co/Salud-y-Proteccion-Social/SIVICAP-2015/yjkc-jgd2/data> [Consultado: 12 de Febrero del 2017].

ANEXO 1. Producción de agua en el transcurso de 3 horas.

Replica	FILTRO 1				FILTRO 2				FILTRO 3			
	Tiempo (min)	Altura Agua (cm)	Volumen (L)	Caudal (L/h)	Tiempo (min)	Altura Agua (cm)	Volumen (L)	Caudal (L/h)	Tiempo (min)	Altura Agua (cm)	Volumen (L)	Caudal (L/h)
1	30	1,50	1,02	2,05	30	4,50	3,07	6,15	30	1,50	1,02	2,05
	60	2,00	1,37	1,37	60	5,50	3,76	3,76	60	2,50	1,71	1,71
	90	2,50	1,71	1,14	90	6,00	4,10	2,73	90	3,50	2,39	1,59
	120	3,00	2,05	1,02	120	7,00	4,78	2,39	120	4,00	2,73	1,37
	150	4,00	2,73	1,09	150	7,50	5,12	2,05	150	5,00	3,42	1,37
	180	4,50	3,07	1,02	180	8,00	5,46	1,82	180	6,00	4,10	1,37
2	30	1,00	0,68	1,37	30	3,50	2,39	4,78	30	1,50	1,02	2,05
	60	1,80	1,23	1,23	60	4,00	2,73	2,73	60	2,00	1,37	1,37
	90	2,30	1,57	1,05	90	5,00	3,42	2,28	90	2,50	1,71	1,14
	120	2,70	1,84	0,92	120	5,50	3,76	1,88	120	3,00	2,05	1,02
	150	3,00	2,05	0,82	150	6,00	4,10	1,64	150	3,30	2,25	0,90
	180	3,40	2,32	0,77	180	6,50	4,44	1,48	180	3,80	2,60	0,87
3	30	1,50	1,02	2,05	30	2,20	1,50	3,01	30	3,20	2,19	4,37
	60	2,00	1,37	1,37	60	3,20	2,19	2,19	60	4,00	2,73	2,73
	90	2,50	1,71	1,14	90	4,00	2,73	1,82	90	5,30	3,62	2,41
	120	2,80	1,91	0,96	120	4,50	3,07	1,54	120	5,80	3,96	1,98
	150	3,10	2,12	0,85	150	5,00	3,42	1,37	150	6,30	4,30	1,72
	180	3,30	2,25	0,75	180	5,70	3,89	1,30	180	7,00	4,78	1,59
4	30	1,50	1,02	2,05	30	1,80	1,23	2,46	30	1,50	1,02	2,05
	60	2,00	1,37	1,37	60	2,50	1,71	1,71	60	2,00	1,37	1,37
	90	2,30	1,57	1,05	90	3,00	2,05	1,37	90	2,50	1,71	1,14
	120	2,60	1,78	0,89	120	3,50	2,39	1,20	120	3,00	2,05	1,02
	150	2,80	1,91	0,77	150	4,00	2,73	1,09	150	3,50	2,39	0,96
	180	3,10	2,12	0,71	180	4,50	3,07	1,02	180	4,00	2,73	0,91
5	30	1,00	0,68	1,37	30	1,50	1,02	2,05	30	1,00	0,68	1,37
	60	1,50	1,02	1,02	60	2,50	1,71	1,71	60	1,50	1,02	1,02
	90	2,00	1,37	0,91	90	3,00	2,05	1,37	90	2,50	1,71	1,14
	120	2,30	1,57	0,79	120	3,30	2,25	1,13	120	3,00	2,05	1,02
	150	2,50	1,71	0,68	150	3,80	2,60	1,04	150	3,50	2,39	0,96
	180	2,80	1,91	0,64	180	4,20	2,87	0,96	180	3,80	2,60	0,87
6	30	1,50	1,02	2,05	30	3,50	2,39	4,78	30	2,00	1,37	2,73
	60	2,50	1,71	1,71	60	4,50	3,07	3,07	60	3,00	2,05	2,05
	90	2,80	1,91	1,28	90	5,50	3,76	2,50	90	3,50	2,39	1,59
	120	4,00	2,73	1,37	120	6,00	4,10	2,05	120	3,70	2,53	1,26

	150	4,80	3,28	1,31	150	6,50	4,44	1,78	150	4,00	2,73	1,09
	180	5,50	3,76	1,25	180	7,00	4,78	1,59	180	4,30	2,94	0,98
7	30	1,50	1,02	2,05	30	2,30	1,57	3,14	30	1,50	1,02	2,05
	60	2,00	1,37	1,37	60	3,00	2,05	2,05	60	2,00	1,37	1,37
	90	2,30	1,57	1,05	90	3,50	2,39	1,59	90	2,50	1,71	1,14
	120	2,60	1,78	0,89	120	4,00	2,73	1,37	120	3,00	2,05	1,02
	150	2,80	1,91	0,77	150	4,50	3,07	1,23	150	3,50	2,39	0,96
	180	3,00	2,05	0,68	180	5,00	3,42	1,14	180	4,00	2,73	0,91
PROMEDIO	30	1,36	0,93	1,85	30	2,76	1,88	3,77	30	1,74	1,19	2,38
	60	1,97	1,35	1,35	60	3,60	2,46	2,46	60	2,43	1,66	1,66
	90	2,39	1,63	1,09	90	4,29	2,93	1,95	90	3,19	2,18	1,45
	120	2,86	1,95	0,98	120	4,83	3,30	1,65	120	3,64	2,49	1,24
	150	3,29	2,24	0,90	150	5,33	3,64	1,46	150	4,16	2,84	1,14
	180	3,66	2,50	0,83	180	5,84	3,99	1,33	180	4,70	3,21	1,07

ANEXO 2. Porcentajes de Remoción.

<i>Replica</i>	TURBIEDAD				COLOR			
	S.G.	FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 3	S.G.	FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 3
1	-	63,86 %	69,61 %	84,62 %	-	68,29 %	97,56 %	90,00 %
2	12,00 %	34,40 %	56,40 %	64,55 %	7,41 %	70,37 %	85,19 %	88,00 %
3	2,42 %	67,34 %	12,10 %	69,01 %	15,79 %	100,00 %	36,84 %	100,00 %
4	18,27 %	87,02 %	27,88 %	85,29 %	8,70 %	100,00 %	30,43 %	100,00 %
5	16,86 %	86,97 %	31,80 %	69,12 %	3,70 %	96,30 %	11,11 %	84,62 %
6	39,12 %	88,44 %	76,68 %	74,73 %	28,85 %	88,46 %	75,00 %	78,38 %
7	17,86 %	74,35 %	52,27 %	72,73 %	28,57 %	91,43 %	71,43 %	84,00 %
8	31,43 %	82,29 %	37,14 %	69,58 %	16,00 %	96,00 %	24,00 %	57,14 %
9	9,91 %	80,86 %	77,48 %	77,50 %	21,05 %	86,84 %	68,42 %	80,00 %
PROMEDIO	18,48 %	73,95 %	49,04 %	74,13 %	16,26 %	88,63 %	55,55 %	84,68 %

<i>Replica</i>	COLIFORMES TOTALES				COLIFORMES FECALES			
	S.G.	FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 3	S.G.	FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 3
1	0,16 %	99,68 %	99,26 %	99,55 %	89,11 %	99,50 %	99,64 %	97,58 %
2	7,79 %	99,66 %	99,80 %	99,37 %	39,97 %	99,78 %	99,86 %	99,39 %
3	10,28 %	99,55 %	98,80 %	98,54 %	5,80 %	99,91 %	99,18 %	99,50 %
4	12,20 %	99,83 %	98,96 %	99,68 %	36,36 %	97,88 %	90,30 %	94,76 %
5	33,59 %	99,89 %	97,27 %	99,91 %	41,94 %	98,39 %	90,97 %	100,00 %
6	2,53 %	99,27 %	98,72 %	98,83 %	31,58 %	95,79 %	93,68 %	90,00 %
7	26,19 %	99,62 %	99,64 %	97,96 %	50,00 %	96,54 %	94,62 %	96,92 %
8	12,93 %	99,34 %	99,00 %	99,18 %	85,71 %	99,68 %	98,25 %	92,22 %
9	29,80 %	99,12 %	99,52 %	98,56 %	14,48 %	99,17 %	99,24 %	99,52 %
PROMEDIO	15,05 %	99,55 %	99,00 %	99,06 %	43,88 %	98,52 %	96,19 %	96,65 %