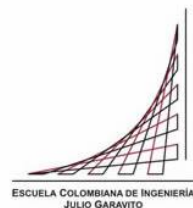


Maestría en Ingeniería Civil

**Implementación y evaluación de dos filtros de cascarilla de arroz
y luffa para el tratamiento de agua de escorrentía de techo del
Edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**

Andrés Eduardo Prieto Núñez

Bogotá, D.C., 31 de abril de 2019



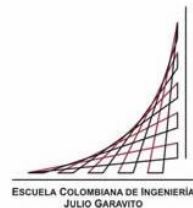
**Implementación y evaluación de dos filtros de cascarilla de arroz
y luffa para el tratamiento de agua de escorrentía de techo del
Edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.**

María Paulina Villegas De Brigard

Director

Bogotá, D.C., 31 de abril de 2019



La tesis de maestría titulada Implementación y evaluación de dos filtros de cascarilla de arroz y luffa para el tratamiento de agua de escorrentía de techo del Edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”, presentada por Andrés Eduardo Prieto Núñez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

María Paulina Villegas De Brigard

Jurado

Amalia Avendaño Sánchez

Jurado

Mónica Andrea Vargas Solla

Bogotá, D.C., 29 de mayo de 2019 (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

Dedicatoria

Aportando a la conservación y uso más racional de los recursos naturales, base fundamental del desarrollo de las sociedades y la vida.

Agradecimientos

En el desarrollo de esta investigación encontré en varias personas aportes valiosos en materia de conocimientos en el área de la gestión integral del recurso hídrico.

De esta manera agradezco a las ingenieras docentes, María Paulina Villegas, directora del proyecto, por su valioso aporte técnico e investigativo en el desarrollo del proyecto, de igual forma destaco el importante apoyo por parte de la ingeniera y docente, Amalia Avendaño, por su participación técnica e investigativa en aspectos físicos del proyecto.

Por otra parte saludar y agradecer a los funcionarios administrativos del área de laboratorios por su apoyo y colaboración en las diversas actividades que se llevaron a cabo para lograr la culminación del proyecto.

Y por último agradecer a mi familia y amigos por el apoyo moral y económico que me brindaron, y reconocer que dicho proyecto se hizo con el afán de demostrar a ellos que no invirtieron en vano sus esperanzas en mí.

Resumen

El agua lluvia representa un valioso recurso natural que puede ser aprovechado, porque constituye la materia prima para implementar alternativas de uso sostenible y eficiente del agua; adicionalmente, es una opción asequible para proporcionar agua a las comunidades que no cuentan con este recurso. En lugares apartados donde no se cuenta con estructuras para la captación, almacenamiento, tratamiento y suministro de agua, se hace necesaria la implementación de alternativas eficientes, innovadoras y económicas que puedan suplir las necesidades básicas de las comunidades.

El trabajo de grado evaluó un sistema de tratamiento para agua lluvia de escorrentía de cubiertas empleando materiales orgánicos lignocelulósicos como lecho en filtros de flujo descendente. Los materiales evaluados fueron luffa cilíndrica (estropajo) y cascarilla de arroz. El funcionamiento de los filtros se evaluó a través de parámetros hidráulicos y análisis físicos, químicos y biológicos que permitieron establecer la eficiencia del proceso. El diseño conceptual de los filtros se basó en el diseño propuesto por A. Rim-Rukeh, G.O. Ikhifa (Treatment of Harvested Rainwater in a Pilot Scale Fixed – Bed Filled with Bone Char), el cual consiste en la construcción de un filtro piloto hecho con tubo PVC (50 cm de alto y 9 cm de diámetro) con lecho filtrante (cascarilla de arroz y luffa) a un nivel de 30 cm.

En cuanto a la verificación de la eficiencia del tratamiento se realizaron análisis físicos y químicos, obteniendo como resultado los siguientes rangos finales del agua tratada, pH entre 6,39 y 7,10, turbiedad entre 0,5 y 4,5 UNT, sólidos suspendidos totales entre 8 y 58 mg/L, DQO entre 18,6 y 38,8 mg/L, DBO entre 9,12 y 10,10 mg/L y nitratos entre 0,7 y 1,3 mg/L N-NO₃.

En los primeros tres días de análisis, los resultados de turbiedad, pH, DQO y nitratos aumentaron después de la filtración, pero luego se observó una disminución de los mismos; esto demuestra que los filtros son funcionales y prácticos, por lo que se pueden emplear en lugares carentes de tecnologías para satisfacer la necesidad de agua.

Índice general

Introducción	14
1 Revisión del estado de arte	16
2 Marco Teórico.....	19
Recolección.....	20
Limpieza.....	20
Distribución	20
2.1 Calidad del agua.....	21
3 Objetivos.....	22
3.1 Objetivo general	22
3.2 Objetivo específico	22
4 Metodología.....	23
Marco legal y normativo:	25
5 Diseño de los filtros piloto	26
5.1 Captación de agua lluvia.....	26
5.2 Filtros.....	26
5.3 Oferta y demanda hídrica para el área de la bajante escogida.	33
5.3.1 Criterios de diseño.....	33
5.3.2 Determinación de la precipitación promedio mensual	34
5.3.3 Determinación del abastecimiento	35
5.3.4 Determinación de número de usuarios	36
5.3.5 Determinación de la dotación de agua.....	37
5.3.6 Determinación de la demanda	38
5.4 Determinación de oferta y demanda para todo el techo del edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	39
6 Resultados.....	41
6.1 Técnicas para la recolección de información	41
6.2 Características fisicoquímicas del agua de escorrentía almacenada y del agua tratada.....	41
7 Análisis de resultados.....	44
7.1 Demanda Química de Oxígeno -DQO	44

7.2	Demanda Biológica de Oxígeno-DBO.....	44
7.3	Color.....	45
7.4	Turbiedad	46
7.5	pH.....	47
7.6	Conductividad.....	48
7.7	Nitratos.....	49
7.8	Sólidos Suspendidos Totales.....	50
7.9	Análisis de los lechos filtrantes	51
7.9.1	Calidad del efluente	53
8	CONCLUSIONES	55
9	RECOMENDACIONES.....	56
10	BIBLIOGRAFÍA	57
	Anexos	60

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros a Analizar.....	25
Tabla 2. Medición de caudales a la entrada de cada filtro.....	31
Tabla 3. Precipitación mensual estación Guaymaral.....	34
Tabla 4. Precipitación promedio mensual estación Guaymaral.....	35
Tabla 5. Oferta de agua para la bajante escogida.....	36
Tabla 6. Número de usuarios por fecha.....	37
Tabla 7. Determinación de la demanda de agua para un solo baño.....	38
Tabla 8. Oferta de agua para el total del techo del edificio I.....	39
Tabla 9. Determinación de la demanda de agua para seis baterías de baños.....	40
Tabla 10. Porcentaje de agua que se puede suplir.....	40
Tabla 11. Resultados primer periodo de prueba para agua filtrada a través de cascarilla de arroz.....	42
Tabla 12. Resultados primer periodo de prueba para agua filtrada a través de luffa.....	42
Tabla 13. Resultados segundo periodo de prueba para agua filtrada a través de cascarilla de arroz.....	43
Tabla 14. Resultados segundo periodo de prueba para agua filtrada a través de luffa.....	43
Tabla 15. Sólidos Volátiles antes del proceso de filtración.....	53
Tabla 16. Sólidos Volátiles después del proceso de filtración.....	53
Tabla 17. Comparación de resultados de agua filtrada con la Resolución 2115 del 2007.....	54

Índice de figuras

Figura 1. Especificaciones del filtro.....	24
Figura 2. Partes del filtro.....	28
Figura 3. Flujo del agua en los filtros.	28
Figura 4. Teoría Botella Mariotte.....	29
Figura 5. Volumen tanque para botella Mariotte.....	30

Índice de gráficas

Gráfica 1. Remoción de DQO.	44
Gráfica 2. Remoción de DBO ₅	45
Gráfica 3. Remoción de Color.	46
Gráfica 4. Remoción de Turbiedad	47
Gráfica 5. Variación del pH.	48
Gráfica 6. Variación de la Conductividad.	49
Gráfica 7. Variación del contenido de Nitratos.	50
Gráfica 8. Remoción de Sólidos Suspendidos.	51

Índice de fotografías

Fotografía 1. Captación de agua lluvia.....	26
Fotografía 2. Tamizado a la cascarilla de arroz.....	27
Fotografía 3. Prueba del tanque para caudal constante.	30
Fotografía 4. Montaje de los Filtros.....	31
Fotografía 5. Estado de cascarilla de arroz antes y después de su uso.	52
Fotografía 6. Estado de la luffa antes y después de su uso.	52
Fotografía 7. Multiparámetro HACH.....	64
Fotografía 8. Equipo medición de turbiedad.....	64
Fotografía 9. Equipo medición de Color.....	65
Fotografía 10. Equipo medición conductividad.....	65
Fotografía 11. Medición DBO.....	66
Fotografía 12. Procedimiento para medición de Sólidos Suspendidos Totales	66
Fotografía 13. Equipo empleado en el procedimiento para la determinación de DQO	67
Fotografía 14. Toma de datos en la determinación de Nitratos	67

Índice de anexos

Anexo 1. Resultados del agua lluvia almacenada.	61
Anexo 2. Resultados del agua lluvia pasada por el filtro de cascarilla de arroz.	61
Anexo 3. Resultados del agua lluvia pasada por el filtro de luffa.	62
Anexo 4. Resultados caudal y carga hidráulica para el filtro de cascarilla de arroz.	62
Anexo 5. Resultados caudal y carga hidráulica para el filtro de luffa.	62

Introducción

En la antigüedad se consideraba el agua desde una visión filosófica como un elemento básico y representativo de todas las sustancias líquidas; dicha consideración fue empleada hasta que fue descartada por científicos como Pierre Le Petit y el británico Edmond Halley en la última mitad del siglo XVII. El agua es el compuesto más importante para todos los seres vivos ya que estamos compuestos en gran mayoría de ella, y es necesario para todos los procesos tanto biológicos como económicos. En los comienzos de la vida, el agua ha sido definida imperfectamente, como un caldo que ayudó a mejorar la convivencia. Hoy, salvo en raros casos, el agua como se encuentra en la naturaleza, no puede ser utilizada directamente para el consumo humano ni para usos industriales, pues no es lo suficientemente pura biológica ni químicamente.

El hecho de que en su ciclo atraviese diferentes medios: subsuelos, superficie de la tierra y atmósfera, hace que el agua modifique su estado original y contenga materias en suspensión o en solución como, por ejemplo, partículas de suelo, residuos de vegetación, organismos vivos (plancton, bacterias, virus), sales diversas, cloruros, sulfatos, carbonatos, materia orgánica, ácidos húmicos, residuos de fabricación, gases, etc.

Por efectos de la contaminación producida por una sociedad de consumo, nos enfrentamos con catástrofes irreversibles, como la contaminación de acuíferos, uso irracional de fuentes superficiales y, aunque se habla mucho de la importancia del agua, no hay una verdadera conciencia social sobre el cuidado que debemos tener al hacer uso de ella.

Las recientes sequías ocurridas en diversas partes del mundo han dado a conocer los riesgos de no tener alternativas eficientes en materia de conservación del agua con relación al desabastecimiento de la misma en las zonas urbanas. Por tal motivo se hace necesario incursionar en procesos de cosecha del agua lluvia que, en términos más precisos, significa la captación, almacenamiento y conservación de agua. Anteriormente se usaban simples técnicas de almacenamiento como jarras y ollas; conviene destacar que esta tecnología "antigua" ha vuelto a ganar popularidad en estos días de climas extremos y en lugares apartados sin infraestructuras adecuadas para la producción de agua potable, especialmente en las zonas de períodos prolongados de lluvia escasa o nula.

El agua de lluvia recolectada es una valiosa fuente de agua para miles de usos. Sin embargo, el agua para el consumo humano y uso doméstico debe estar libre de contaminantes. Es así como se hace necesaria la implementación de un sistema alternativo, de bajo costo y fácil uso para la purificación del agua.

Esta investigación pretende presentar un método de tratamiento que utiliza un lecho fijo de material orgánico inerte con el cual se intenta mejorar la calidad del agua lluvia; con esta

tecnología se puede demostrar que además de su fácil operación, tendrá una buena ventaja económica para suplir una parte de la demanda en lugares con difícil acceso al agua.

1 Revisión del estado de arte

La literatura que encontramos hoy en día plantea diferentes metodologías para el uso y aprovechamiento de agua lluvia, la mayoría para implementarse en residencias rurales o en las zonas de desabastecimiento de agua potable, por su fácil implementación en todas las zonas alejadas, y los bajos costos asociados a la operación y mantenimiento.

Las principales técnicas encontradas plantean sistemas de captación de agua lluvia en los techos, por medio de las canaletas que conducen el agua hacia un tanque de almacenamiento. En la mayoría de casos su posterior uso es el de consumo humano y en menor proporción otros usos que no requieren que el agua sea potable.

En la actualidad la práctica de recolección de aguas lluvias sigue siendo importante en las regiones áridas o semiáridas del mundo, y la mayoría de las publicaciones existentes sobre ésta técnica se basan en experiencias de Medio Oriente, Australia, África del Norte, India, norte de México y sur este de Estados Unidos. Recientemente han aparecido más publicaciones sobre experiencias en África (Sub-Sahara y del Sur) y en América Latina. Estas publicaciones describen algunas experiencias en México, Brasil y en menor cantidad en los Andes. Factores tales como el lugar de aplicación, el método, las tecnologías, la complejidad del sistema, la finalidad y los usos posibles, hacen que los sistemas varíen desde barriles de agua lluvia para el riego de jardines en zonas urbanas, hasta la recolección a gran escala de agua lluvia para todos los usos domésticos de una ciudad (Texas Water Development Board –TWDB, 2000). Dentro de la revisión bibliográfica se encontraron similitudes en cuanto a la definición de los componentes básicos de los sistemas de aprovechamiento. El TWDB plantea que los sistemas deben tener seis componentes básicos: captación en techos, recolección por canaletas y bajantes, interceptor de primeras aguas, almacenamiento en tanques, sistema de distribución y tratamiento. Estos componentes serían los requeridos para utilizar el agua lluvia para consumo humano y usos domésticos. Pero independientemente del uso que se vaya a dar al agua lluvia, todo sistema debe tener al menos tres componentes básicos: captación, interceptor y almacenamiento (Abdulla, Al-Shareef, 2010). El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), plantea la necesidad de instalar un filtro de arena para remover las partículas que son conducidas por el interceptor de las aguas, esto previo al tratamiento con cloro (Guía de diseño para captación del agua de lluvia, 2001).

Uno de los parámetros más importantes dentro del diseño de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, es la determinación de los volúmenes de almacenamiento, seguido del potencial de ahorro de agua potable. Dentro de la literatura revisada se encontraron similitudes para la determinación de dichos parámetros. El cálculo del volumen de almacenamiento de agua lluvia es descrito claramente por el CEPIS (Guía de diseño para captación del agua de lluvia, 2001), el cual se determina a partir de la diferencia entre la oferta acumulada y la demanda acumulada. Autores como Abdulla y Al-Shareef y Ghisi realizan dicho cálculo como el producto entre la precipitación promedio mensual o anual, el área de captación y el coeficiente de escorrentía, lo cual brindaría únicamente el valor de la oferta disponible (Duque, 1993).

Muchos de los documentos revisados se centran en el análisis de la calidad del agua lluvia, inclusive con captaciones en áreas diferentes a los techos, como plantea Nolde, quien hace un análisis de la posibilidad de utilizar el agua lluvia de escorrentía de las superficies de tránsito vehicular, logrando demostrar que es viable. Otros autores que hacen referencia a la calidad del agua lluvia para consumo humano son Sazakli, Alexopoulos y Leotsinidis; durante tres (3) años recolectaron 300 muestras, 156 de los tanques de almacenamiento que recibían directamente el agua lluvia, y los 144 restantes se extrajeron de las aguas subterráneas de la región. Los resultados mostraron que el agua lluvia es la fuente más prometedora para abastecer con agua potable a las poblaciones afectadas. Evans, Coombes y Dunstan analizaron el efecto que tienen los patrones climáticos, como el viento, en la calidad del agua lluvia almacenada. Los resultados mostraron que dichos patrones, en conjunto con el sitio de almacenamiento pueden intervenir significativamente en la carga bacteriana del agua lluvia captada en los techos, siendo el viento un factor directamente proporcional a dicha carga.

Aunque el objetivo de éste proyecto no es utilizar el agua lluvia para consumo humano, este proyecto puede dar inicio a nuevos estudios para que el agua lluvia sea potable, la revisión de estas experiencias demostraría que los valores microbiológicos obtenidos pueden ser fácilmente removidos, ya que hoy en día existen múltiples tratamientos de desinfección para el tratamiento de aguas y en un futuro la institución podría considerarlo como una opción.

De las fuentes consultadas, la metodología más completa y de mayor aplicabilidad para el diseño del proyecto, debido a que reúne los criterios requeridos para el logro del objetivo general en cuanto a su fácil aplicación y bajo costo dentro de la institución, está planteada en el artículo titulado: Tratamiento de agua de lluvia recolectada en una escala piloto Fijo - Alojamiento relleno con hueso (Rim-Rukeh, Awatafete, & Okoyoko, 2007), porque en ella se analiza un filtro con material de hueso en términos de eficiencia de remoción de contaminantes en agua lluvia almacenada, del artículo fueron analizados los parámetros pH, temperatura, turbidez, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Disueltos Totales, Demanda Biológica de Oxígeno. El documento expuesto anteriormente, fue el que dio inicio para esta investigación, ya que se ajustaba para analizar lechos filtrantes en el tratamiento de agua de escorrentía en techos.

A pesar que el agua lluvia recolectada puede tener diferentes usos, en Colombia no se cuenta con estudios de sistemas con tratamiento alternativos de bajo costo y fácil uso, razón por lo cual surge esta investigación, la cual busca evaluar un sistema de tratamiento con dos materiales filtrantes de propiedades lignocelulosicas (cascarilla de arroz y luffa). En la actualidad la cascarilla de arroz se considera como un residuo, estos materiales orgánicos no son utilizados como materia prima o no se les ha dado un aprovechamiento, es por esto que se quieren evaluar, dado que pueden resultar prácticos y beneficiosos en el tratamiento de agua de escorrentía.

Luego de realizar revisión bibliográfica del residuo lignocelulósico agroindustrial (cascarilla de arroz) y del producto biodegradable (luffa), se puede concluir que en la actualidad ambos

materiales no cuentan con estudios para el tratamiento de aguas de escorrentía; en cambio, si se encuentran similitudes en estudios para la remoción de cromo presente en las aguas resultantes de la curtición (Yansy Milena Rodríguez, 2012). En varios estudios encontrados la cascarilla de arroz se evaluó como agente activante para la remoción de metales pesados. La parte experimental de estos estudios consistió en la calcinación de la cascarilla de arroz, la activación química y pruebas de adsorción y absorción atómica. En cuanto a la luffa, en los estudios encontrados, se indica que es un material con estructura fibrosa, esponjosa y nano tubular, que posee una alta capacidad absorbente capaz de retener metales pesados como el cadmio (Navarrete, 2009).

2 Marco Teórico

La frase "recolección de aguas lluvias" es una de las que en la última década más resonancia ha generado. Se trata sencillamente de aprovechar el agua lluvia ya sea como apoyo o sustitución del sistema de agua potable con el objetivo de evitar el desperdicio del vital líquido. En áreas donde el sistema de agua potable no existe o el abastecimiento de agua no es constante, se ha tratado de implementar sistemas que ayuden a suplir las necesidades humanas.

Empezaremos hablando del agua lluvia, éste es un fenómeno atmosférico que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes, según la definición oficial de la Organización Meteorológica Mundial, la lluvia es la precipitación de partículas líquidas de agua, de diámetro mayor de 0,5 mm, y, si el diámetro es menor, es considerada como llovizna. Hoy en día, también se habla de lluvia ácida, la cual es una consecuencia de la contaminación atmosférica. Se produce cuando las emisiones contaminantes de las fábricas, automóviles o calderas de calefacción entran en contacto con la humedad de la atmósfera. Estas emisiones contienen óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y trióxido de azufre, que al mezclarse con agua se transforman en ácido sulfuroso, ácido nítrico y ácido sulfúrico. Este proceso también sucede de forma natural a través de las erupciones volcánicas. Los ácidos resultantes se precipitan a la Tierra en forma de lluvia o nieve con consecuencias muy negativas: por un lado, los daños a la naturaleza en forma de acidificación de suelos, lagos y mares con el consiguiente perjuicio para la flora y la fauna terrestre y marina. Por otro lado, la lluvia ácida provoca también la corrosión de elementos metálicos en edificios, puentes, torres y otras estructuras; y la destrucción del patrimonio humano realizado en piedra caliza, edificios, construcciones históricas, estatuas y esculturas.

El agua lluvia posee características especiales; las superficies que tienen contacto con el agua pueden tener diversos tipos de contaminantes, que pueden ser arrastrados por ella.

Cuando el agua corre por las superficies urbanas impermeables, disuelve minerales naturales y arrastra sustancias resultantes de la presencia de animales o de la actividad humana y toda clase de contaminantes previamente acumulados en ellas, hacia los cuerpos de agua receptores. Los contaminantes que pueden presentarse en las aguas naturales incluyen:

- Contaminantes microbianos, tales como virus y bacterias, que pueden originarse en plantas de tratamiento de agua, sistemas sépticos, actividades agrícolas y ganaderas y de la vida silvestre.
- Contaminantes inorgánicos, tales como sales y metales, que pueden ser de origen natural o resultar de escorrentías de aguas pluviales, de descargas de aguas residuales

industriales o domésticas, de la producción petrolera y de gas, de la minería o de la agricultura.

- Pesticidas y herbicidas, que pueden resultar de una amplia variedad de fuentes tales como la agricultura, las escorrentías urbanas y el uso residencial.
- Contaminantes químicos orgánicos, que incluyen químicos orgánicos sintéticos volátiles, que son productos secundarios de procesos industriales y de la producción petrolera, y que también pueden originarse en estaciones de gasolina, escorrentías de aguas pluviales urbanas y de sistemas sépticos.

El proceso de aprovechamiento de agua lluvia consta de los siguientes pasos:

Recolección

Consiste en el uso de una superficie lo suficientemente apropiada para la captación del agua lluvia; en el caso del presente estudio es el techo del Edificio I de las instalaciones de la universidad, que por medio de pendientes dirigen el líquido hacia una canaleta, que a su vez lo lleva hacia el área de almacenamiento (tanque). Esta área de recolección debe contar con un mantenimiento periódico; el mantenimiento que se le da a un techo promedio suele bastar para asegurarse de que el agua que se obtiene carezca de una gran cantidad de microorganismos, sólidos y materia orgánica dañina para plantas, cultivos y animales, aunque no garantiza la potabilidad del agua.

Limpieza

Canaletas y bajantes de recolección de agua lluvia llevarán el agua hasta el tanque de almacenamiento, con el objetivo de que partículas extrañas (basura, tierra, etc.) se queden en el fondo del mismo reduciendo al mínimo la contaminación por sólidos, previniendo tapones en el sistema del filtro diseñado, en las tuberías o sistemas de riego. Posteriormente, si se desea que el agua sea apta para alguna de las formas de consumo humano, como por ejemplo que la destinación del agua lluvia sea en los baños, ésta debe pasar a través de un filtro de fácil construcción que la despojará de contaminantes orgánicos.

Distribución

El agua recolectada puede ser destinada para varios usos, tales como jardinería, lavado de fachadas o para la descarga de los inodoros en baños. La forma de construcción dependerá también de los recursos con los que se cuente; sin embargo, con el fin de bajar los costos, la propuesta constructiva para las redes es el uso de tecnología apropiada como, por ejemplo, sistemas de flujo de gravedad.

2.1 Calidad del agua

Cuando se considera el mejoramiento de la calidad del agua se debe tener también en cuenta el uso que se le dará, así como la cantidad y proximidad desde el sistema de almacenamiento. El agua fácilmente recolectada tiene todo tipo de impurezas que le dan olor, color, turbidez y otras características indeseables. Estas impurezas pueden ser orgánicas, como hojas o heces de pájaro, o inorgánicas, como tierra, minerales y metales disueltos. Aunque existen procesos para purificar el agua, esto no garantiza que el agua sea completamente apta para el consumo humano.

Con relación a las alternativas de tratamiento de agua lluvia almacenada se presentan casos como el de las Islas Canarias, en el que se emplean depósitos bajo la tierra, para recoger y conservar el agua lluvia que constan de un pequeño desarenador, un tanque rectangular cubierto por un techo semicircular y por último una pileta de recolección empleando un balde para tal fin. Otra alternativa es la captación del agua lluvia en una superficie de piedra laja o la conducción del agua a través de un filtro de combinación rugosa, arena fina y carbón lo que nos da a conocer la practicidad de emplear estas opciones (Margarita, 2008, págs. 43-50).

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Construir y evaluar dos filtros pilotos de lecho de cascarilla de arroz y luffa para el tratamiento de agua de esorrentía de techo del Edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”.

3.2 Objetivo específico

- Realizar una revisión bibliográfica de uso de la cascarilla de arroz y la luffa en sistemas de tratamiento de agua.
- Determinar la oferta de agua de esorrentía del techo del Edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”.
- Construir dos filtros pilotos con medio filtrante de cascarilla de arroz y luffa para el tratamiento del agua de esorrentía recogida del techo del bloque I de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”.
- Evaluar la eficiencia de cada filtro.
- Comparar los resultados obtenidos con la Resolución 2115 del 22 de junio del 2007, además, determinar que usos se le pueden dar al agua tratada.

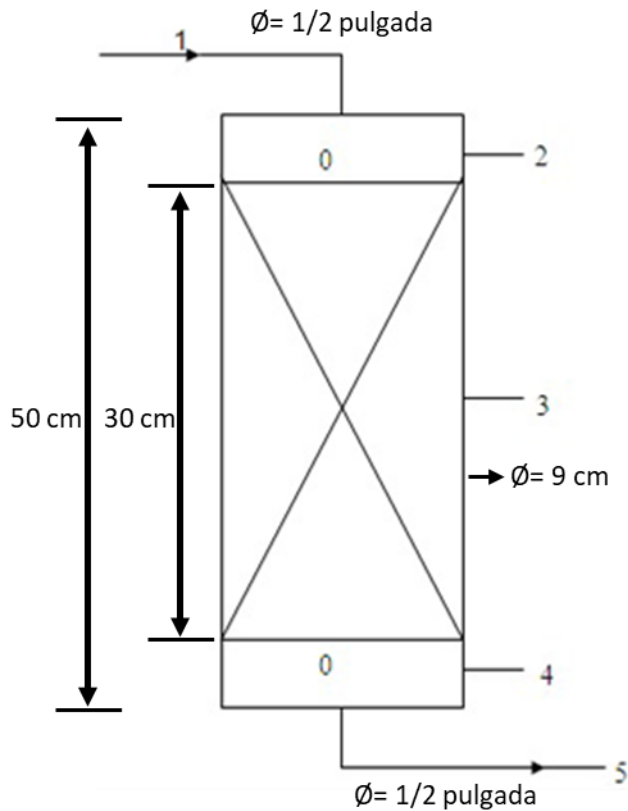
4 Metodología

Se realizó una visita dentro de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito con personal de planta física de la universidad, en la que se observaron posibles puntos de recolección de agua lluvia de los edificios de la universidad, con lo cual se pudo establecer que el edificio “I” tenía puntos de captación con fácil acceso. Luego se solicitaron los planos para obtener el área del techo y, una vez definido el edificio y el punto de captación, se procedió a tomar los datos directamente de la estación meteorológica Guaymaral, ubicada dentro de las instalaciones de la Escuela. Se realizó un promedio de datos de precipitación de los últimos 21 años. Por último se realizó el cálculo de demanda y oferta hídrica de escorrentía del techo del edificio I.

Se diseñaron y construyeron dos filtros, uno se construyó con lecho de cascarilla de arroz y el otro se construyó con lecho de luffa (estropajo).

Se procedió a realizar el montaje de los filtros, se tuvo como base el diseño propuesto por A. Rim-Rukeh, G.O. Ikhifa (Treatment of Harvested Rainwater in a Pilot Scale Fixed – Bed Filled with Bone Char), el cual consistió en la construcción de un filtro piloto hecho con tubo PVC (50 cm de alto y 9 cm de diámetro) con lecho filtrante (cascarilla de arroz y luffa) a un nivel de 30 cm, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Especificaciones del filtro.



Fuente: Autor

- (1) Entrada del agua con tubo P.V.C diámetro de media pulgada.
- (2) Espacio de distribución y filtrado de partículas de diámetro considerable.
- (3) Lecho filtrante (cascarilla de arroz y luffa).
- (4) Falso fondo que permitirá un espacio libre para la salida del agua.
- (5) Tubería de salida con tubo P.V.C de diámetro de media pulgada.

Se recolectó el agua lluvia durante 15 días en un tanque localizado debajo de una bajante del edificio I, luego se procedió a filtrar el agua lluvia en los dos filtros, trabajando en paralelo. El tiempo de operación de los filtros fue de 12 días, durante los cuales se tomaron muestras de agua cada dos días. En el agua recolectada y en el agua filtrada se realizaron análisis de pH, temperatura, turbidez, color, conductividad, SST, DQO, DBO y nitratos. Los resultados obtenidos, comparados con los valores dados para consumo humano por la normativa vigente permitieron determinar las posibilidades de utilización del agua en las instalaciones de la universidad.

Los diferentes parámetros se analizaron según el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

Tabla 1. Parámetros a Analizar.

Parámetro	Unidad	Método de análisis	Standard Methods
pH	-	Electrométrico	4500-H+ B
Turbidez	UNT	Nefelométrico	2130 B
Temperatura	°C	Electrométrico	2550
Color	UPC	Comparación visual 2120B	2120 B
Conductividad	µS/cm a 25 °C	Electrométrico	SM 2510 B
Oxígeno disuelto	mg/L	Luminiscencia	SM 4500-O HASTM D888 - 12e1 Método C
Sólidos suspendidos totales	mg/L	Gravimétrico, secados a 103-105°C	SM 2540 D
Demanda química oxígeno	mg O ₂ /l	Reflujo cerrado - Titulación	SM 5220 C
Demanda Biológica de oxígeno	mg O ₂ /l	Incubación a 5 días - Titulación	SM 5210 B
Nitratos	mg/L	Colorimetría- Ácido cromotrópico	SM 418 D Ed. 15

Fuente: Autor

Marco legal y normativo:

La reglamentación disponible en el ámbito nacional relacionada con el tema del presente estudio es:

- **Decreto 3930 del 25 de Octubre de 2010.** Por el cual se reglamenta parcialmente el Título 1 de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la parte III - Libro I - del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a Usos del Agua y Residuos Líquidos.
- **Resolución 2115 del 22 de Julio de 2007,** Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
- **Resolución 330 del 8 de junio de 2017,** Por el cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico- RAS.

5 Diseño de los filtros piloto

5.1 Captación de agua lluvia

Se instaló un tanque de 200 litros debajo de una de las bajantes del edificio I, luego que pasaron cinco días el tanque se llenó para empezar hacer el muestreo.

Fotografía 1. Captación de agua lluvia.



Fuente: Autor

5.2 Filtros

Elementos utilizados:

- Un tubo de PVC con diámetro de 9 cm y altura de 50 cm, como cuerpo de cada filtro.
- Dos tapones en PVC, del mismo diámetro del tubo, adecuado como entrada y salida de cada filtro.
- Luffa o estropajo: se utilizó luffa cilíndrica con diámetro entre 5 y 7 cm, cortada en rodajas que fueron distribuidas uniformemente a lo largo del filtro, ocupando una profundidad de 30 cm.
- Cascarilla: se empleó cascarilla de arroz seleccionada, previamente lavada, secada y procesada a través de triturado y tamizado, con tamaño de partícula de 2,35 mm o tamiz no. 8. El material quedó confinado en una profundidad de 30 cm.

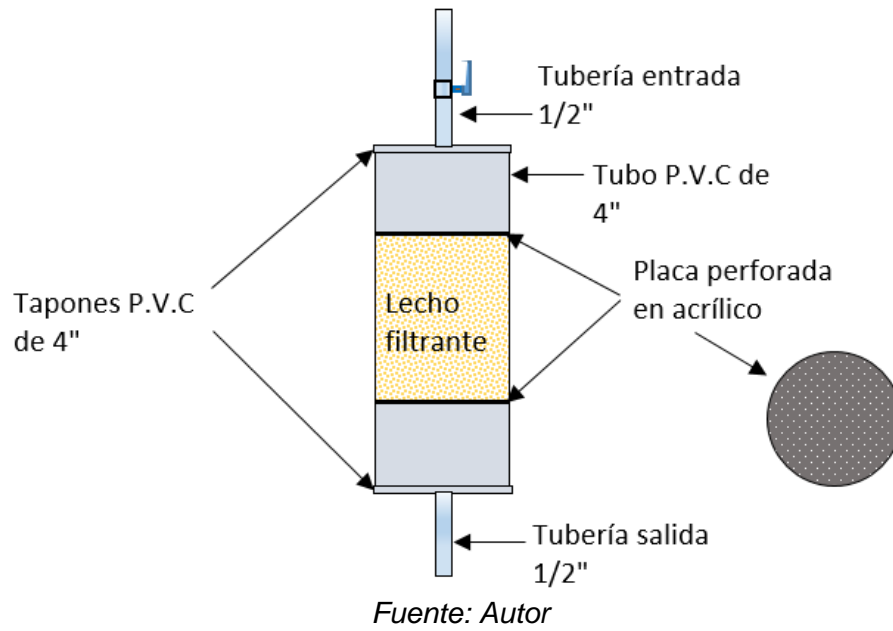
Fotografía 2. Tamizado a la cascarilla de arroz.



Fuente: Autor

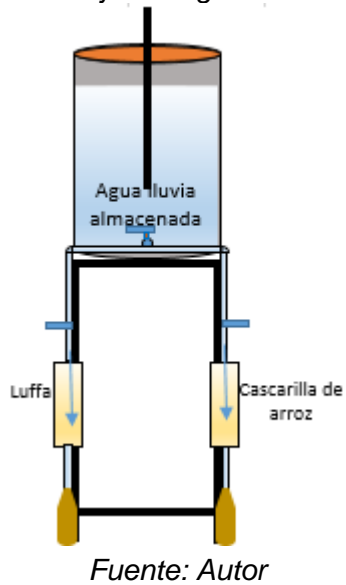
El lecho filtrante se confinó entre placas perforadas de acrílico. La placa superior para lograr una distribución uniforme en toda la sección del filtro y la inferior para evitar el escape de las partículas del lecho filtrante. Luego se colocaron los dos tapones, cada uno con un orificio de media pulgada para la conexión de las tuberías de entrada y salida del flujo, ver Figura 2.

Figura 2. Partes del filtro.



La operación de los filtros se llevó a cabo por gravedad.

Figura 3. Flujo del agua en los filtros.



Para garantizar un caudal constante se utilizó una botella Mariotte, la cual es un dispositivo destinado a conseguir una velocidad de efusión constante simultáneamente para un líquido y un gas.

Deducción teórica

El aire penetra por el tubo y burbujea por su extremo, por lo que la presión atmosférica en el punto A es la atmosférica.

Aplicamos el teorema de Bernoulli entre los puntos A y B

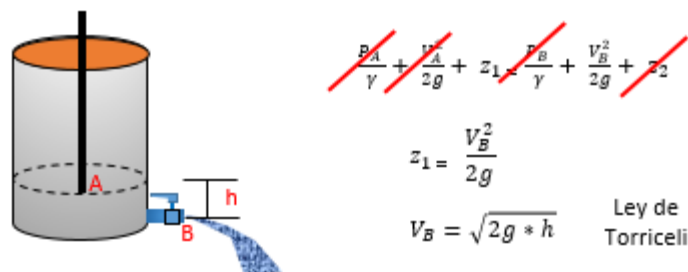
$$p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + \rho g h = p_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \rho g 0$$

Como $p_A = p_B = p_{atm}$ y v_A es nula, queda

$$v_B = \sqrt{2gh}$$

Es importante enfatizar que la rapidez de salida del chorro solo depende de la distancia vertical h entre el nivel del agua y el agujero. Tal como se explica en la siguiente figura:

Figura 4. Teoría Botella Mariotte.



Fuente: Autor

Dentro de las instalaciones de la universidad se realizaron pruebas de velocidad constante para el agua, estas consistieron en llenar el tanque completamente y luego introducirle agua por la tubería vertical para desplazar el posible aire que se podría haber acumulado en la parte superior del tanque, luego se procedió a abrir la válvula para permitir el flujo de agua y con un marcador se dibujó la caída del chorro de la salida de agua, se pudo percibir que al desocuparse el tanque o la lámina de agua disminuía dentro del tanque, la caída del

chorro permanecía a la misma distancia que la inicial, esto indica que la velocidad es constante, se puede concluir que la teoría del caudal constante se cumple.

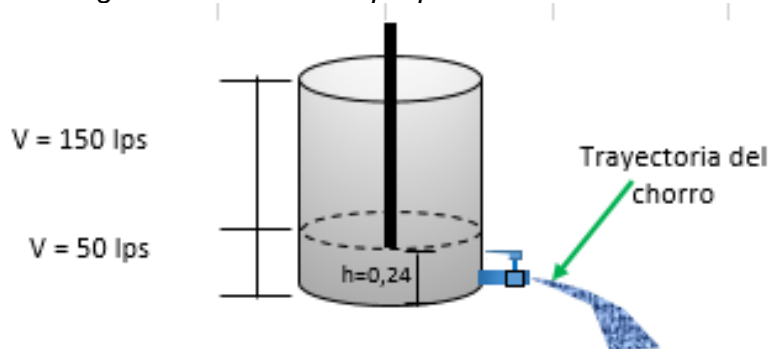
Fotografía 3. Prueba del tanque para caudal constante.



Fuente: Autor

Para esta investigación se utilizó un tanque de 200 litros y se dejó una altura de 0,24 m por encima del fondo del tanque, lo cual da un volumen de 50 litros que quedaron almacenados en el fondo del tanque, tal como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 5. Volumen tanque para botella Mariotte.



Fuente: Autor

En la fotografía 4 se puede observar el montaje de los filtros

Fotografía 4. Montaje de los Filtros



Fuente: Autor

Durante el periodo de prueba de los filtros, se realizaron mediciones de caudal a la entrada de cada filtro, los resultados son los siguientes:

Tabla 2. Medición de caudales a la entrada de cada filtro.

Fecha	Días	Caudal tubo entrada filtro cascarilla de arroz (m ³ /día)	Caudal tubo entrada filtro luffa (m ³ /día)
18-ene-19	1	0,00615	0,00616
21-ene-19	3	0,00613	0,00616
23-ene-19	5	0,00613	0,00615
25-ene-19	8	0,00612	0,00613
28-ene-19	10	0,00611	0,00613
30-ene-19	12	0,00611	0,00612

Fuente: Autor

Como se pudieron haber cometido errores en la medición, se decidió realizar el criterio de Chauvenet, el cual consiste en saber si un dato experimental dentro de un grupo de datos experimentales es un valor atípico o no. Para calcular el criterio de Chauvenet previamente se necesita calcular la media y la desviación típica, tal como se muestra a continuación:

$$Xr = X \pm K(n) * S$$

Xr = Medida de rechazo.

X = Valor de la media.

K(n) = Coeficiente.

n	6	7	8
K(n)	1.73	1.80	1.86

S = Desviación típica.

Para nuestro estudio los resultados son los siguientes:

- Caudales entrada filtro cascarilla de arroz.

$$Xr = 0,0061 + 1.73 * 1,74 * 10^{-5} = 0,00615$$

$$Xr = 0,006 - 1.73 * 1,74 * 10^{-5} = 0,00609$$

El resultado del análisis estadístico arroja un rango de valores comprendido entre 0,00609 m³/día y 0,00615 m³/día. Como se puede observar en la Tabla 2, Todas las mediciones están cumpliendo dentro de ese rango.

- Caudales entrada filtro luffa.

$$Xr = 0,0061 + 1.73 * 1,74 * 10^{-5} = 0,00617$$

$$Xr = 0,006 - 1.73 * 1,74 * 10^{-5} = 0,00611$$

El resultado del análisis estadístico arroja un rango de valores comprendido entre 0,00611 m³/día y 0,00617 m³/día Como se puede observar en la Tabla 2, todas las mediciones están cumpliendo dentro de ese rango.

5.3 Oferta y demanda hídrica para el área de la bajante escogida.

Para el diseño del piloto se tomó como referencia el SCAPT (Sistema de Captación de Agua Pluvial en Techos) el cual permite determinar la oferta hídrica del techo y calcular el volumen máximo de recolección. Para el diseño se requiere conocer los siguientes elementos:

- Datos de precipitación: conocer los datos pluviométricos de la zona a estudiar, y tener como mínimo los registros de los últimos 15 años.
- Material de construcción: se tiene que saber el material con el cual se construyó la superficie de captación.
- Personas: conocer el número de personas que serán beneficiadas del uso del agua recolectada.
- Demanda de agua: establecer el consumo de agua por persona.

5.3.1 Criterios de diseño

Para obtener la oferta hídrica del techo del Edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería, se tienen los siguientes datos:

- Número de usuarios: 200 personas
- Coeficiente de escorrentía: En este caso los techos del Edificio I son en cemento, que tienen un coeficiente de 0,7 a 0,8
- Dotación de agua: 5,19 litros por usuario por día.
- Área del techo que recoge la bajante escogida: 592,82 m²

5.3.2 Determinación de la precipitación promedio mensual

Los datos de precipitación se obtuvieron de la estación pluviométrica Guaymaral, que se encuentra ubicada dentro de las instalaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería, y es operada por la Secretaría de Ambiente de Bogotá.

A continuación se presentan los datos suministrados por la Secretaría de Ambiente; se aclara que la estación no tuvo mediciones en algunos meses y que para este trabajo de grado no se realizó un análisis hidrológico detallado, ni el proceso de complemento de datos faltantes. Para la determinación de la oferta hídrica, se calculó con el promedio de los datos obtenidos directamente de la estación meteorológica.

Tabla 3. Precipitación mensual estación Guaymaral.

PRECIPITACION MENSUAL (mm)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICEMBRE
1997								42,7 mm	26,4 mm	19,0 mm	33,0 mm	8,7 mm
1998	54,4 mm	42,4 mm	207,7 mm	208,3 mm	338,4 mm	57,4 mm	79,8 mm	61,2 mm	60,5 mm	255,4 mm	212,3 mm	347,9 mm
1999			151,4 mm	161,0 mm	104,5 mm	193,1 mm	42,5 mm	56,5 mm		103,1 mm	89,9 mm	38,6 mm
2000	32,7 mm	54,2 mm	157,1 mm	75,5 mm	120,4 mm	56,5 mm	31,8 mm	32,4 mm		46,3 mm	2,4 mm	
2001						5,2 mm	27,0 mm	17,9 mm	100,1 mm	24,1 mm	65,9 mm	70,4 mm
2002	9,0 mm	0,7 mm	81,9 mm	103,2 mm	384,0 mm	58,5 mm	21,3 mm	10,9 mm		14,9 mm	81,0 mm	23,5 mm
2003	16,7 mm	0,1 mm	83,9 mm	28,4 mm	20,0 mm	45,4 mm	32,4 mm	20,3 mm	81,0 mm	146,6 mm	177,7 mm	57,1 mm
2004	23,1 mm	1,0 mm		107,1 mm	120,4 mm	41,6 mm	47,6 mm	1,1 mm	23,1 mm	147,8 mm	27,2 mm	
2005			21,6 mm	87,3 mm	138,6 mm	18,9 mm	29,0 mm	6,5 mm		22,5 mm	92,8 mm	54,3 mm
2006	70,0 mm	29,4 mm	2,6 mm	70,1 mm	68,1 mm	68,5 mm	20,8 mm	20,0 mm	18,1 mm	49,3 mm	56,7 mm	17,8 mm
2007	17,8 mm	13,2 mm	3,9 mm	69,2 mm	46,8 mm	36,2 mm	16,5 mm	41,1 mm	7,8 mm	181,1 mm	98,3 mm	116,1 mm
2008	28,3 mm	44,2 mm	171,7 mm	45,3 mm	104,8 mm	20,4 mm	42,4 mm	57,6 mm	26,1 mm	81,6 mm	140,7 mm	57,5 mm
2009	41,5 mm	81,0 mm	66,6 mm	63,9 mm	20,4 mm	20,2 mm	26,5 mm	9,4 mm	19,0 mm	189,5 mm	45,4 mm	28,0 mm
2010	0,2 mm	13,6 mm	15,1 mm	154,2 mm	121,2 mm	87,3 mm	133,9 mm	16,2 mm	70,9 mm	115,7 mm	180,4 mm	107,1 mm
2011	88,9 mm	113,3 mm	99,2 mm	200,4 mm	123,8 mm	72,1 mm	51,9 mm	43,9 mm	58,0 mm	160,8 mm	276,8 mm	98,8 mm
2012	85,5 mm	51,6 mm	46,7 mm	91,5 mm	26,2 mm	22,8 mm	79,7 mm	54,9 mm	14,1 mm	52,8 mm	66,2 mm	46,5 mm
2013	8,8 mm	103,5 mm	56,1 mm	147,6 mm	134,7 mm	12,4 mm	0,2 mm	11,7 mm	34,4 mm	96,9 mm	162,9 mm	56,3 mm
2014	84,3 mm	87,3 mm	114,7 mm	42,3 mm	40,6 mm	47,9 mm	29,8 mm	24,4 mm	46,9 mm	109,1 mm	85,1 mm	123,9 mm
2015	63,6 mm	52,0 mm	78,6 mm	52,0 mm	27,4 mm	46,0 mm	43,0 mm	31,6 mm	39,5 mm	26,4 mm	69,9 mm	3,8 mm
2016	25,7 mm	19,4 mm	146,4 mm	110,8 mm	167,1 mm	23,0 mm	36,8 mm	50,5 mm	74,6 mm	96,4 mm	179,1 mm	54,4 mm
2017	51,2 mm	44,4 mm	183,2 mm	93,8 mm	129,4 mm	88,9 mm	23,4 mm	57,9 mm	44,5 mm	72,3 mm	139,4 mm	57,9 mm
2018	83,3 mm	49,8 mm	99,3 mm	102,6 mm	145,8 mm	78,2 mm	49,6 mm	56,2 mm	62,4 mm	81,1 mm		
PROMEDIO	43,61	44,51	94,09	100,73	119,13	52,40	41,23	32,95	45,19	98,73	109,34	74,74

Fuente: Secretaria de Ambiente de Bogotá

Tabla 4. Precipitación promedio mensual estación Guaymaral.

Promedio mensual	
Mes	Precipitación
Enero	43,61 mm
Febrero	44,51 mm
Marzo	94,09 mm
Abril	100,73 mm
Mayo	119,13 mm
Junio	52,40 mm
Julio	41,23 mm
Agosto	32,95 mm
Septiembre	45,19 mm
Octubre	98,73 mm
Noviembre	109,34 mm
Diciembre	74,74 mm

Fuente: Secretaria de Ambiente de Bogotá

5.3.3 Determinación del abastecimiento

Tomando los promedios mensuales de las precipitaciones de los años evaluados, el área del techo de captación y el material en el cual está construido el techo se determinó el volumen de abastecimiento:

$$A = \frac{P_{pi} * C_e * A_c}{1000}$$

En donde:

P_{pi}: Precipitación promedio mensual (L/m²)

C_e: Coeficiente de escorrentía

A_c: área de captación (m²)

A: Abastecimiento correspondiente al mes (m³)

Tabla 5. Oferta de agua para la bajante escogida.

MES	PRECIPITACION (mm)	ABASTECIMIENTO (m ³)	ABASTECIMIENTO (m ³)
		PARCIAL	ACUMULADO
Enero	43,61	19,39	19,39
Febrero	44,51	19,79	39,18
Marzo	94,09	41,83	81,01
Abril	100,73	44,78	125,80
Mayo	119,13	52,97	178,76
Junio	52,40	23,30	202,06
Julio	41,23	18,33	220,40
Agosto	32,95	14,65	235,05
Septiembre	45,19	20,09	255,14
Octubre	98,73	43,90	299,03
Noviembre	109,34	48,61	347,65
Diciembre	74,74	33,23	380,88

Fuente: Autor

El área de la bajante escogida del Edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería brinda un abastecimiento máximo de 53 m³ correspondientes al mes de mayo.

5.3.4 Determinación de número de usuarios

Para poder determinar la demanda que requiere el edificio I en una de sus baterías de baños, se necesita saber la dotación de agua, como no se cuenta con un estudio de cuantas personas usan los baños del edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería, el autor tomó la determinación de realizar un estudio pequeño durante un tiempo de cuatro días para tener un estimado aproximado de cuantas personas podrían utilizar el baño.

Se realizó una verificación del Edificio I, determinando el número de usuarios en uno de los baños durante una semana, de 7:00 a.m. a 13:00 p.m. Los resultados se presentan en la tabla 6:

Tabla 6. Número de usuarios por fecha.

Día	No. de usuarios
14-ene-19	174
15-ene-19	202
16-ene-19	206
17-ene-19	219
Total	801
Promedio	200

Fuente: Autor

5.3.5 Determinación de la dotación de agua

Se puede observar que la oferta de agua que brinda el techo de 592,82 m² a lo largo del año es de 380,88 m³. Considerando una reserva de 1 m³ de agua, se tiene que la dotación diaria posible de agua lluvia para cada una de las 200 personas es:

$$\frac{(380,9 \text{ m}^3 - 1 \text{ m}^3) * \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right)}{365 \text{ días} * 200 \text{ usuarios}} = 5,19 \frac{\text{L}}{\text{usuario} * \text{día}}$$

Por otra parte, el número de usuarios que podrían atenderse a partir de la dotación requerida según López Cualla. (Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados, 2003), para instalaciones de tipo público será:

Consumo público = 17,7 L/ usuario*día

$$\frac{(380,9 \text{ m}^3 - 1 \text{ m}^3) * \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right)}{365 \text{ días} * 17,7 \frac{\text{L}}{\text{usua}} * d} = 59 \text{ usuarios}$$

Con la dotación que indica López Cualla, solo podremos abastecer a 59 usuarios, esto es el 30 % de los 200 usuarios que proporcionó el estudio.

5.3.6 Determinación de la demanda

Determinación de la demanda:

$$D = \frac{Nu * Nd * Dot}{1000}$$

En donde:

Nu: Número de usuarios que se benefician del sistema (200 usuarios).

Nd: Número de días del mes analizado.

Dot: Dotación (5,19 L/persona*día)

D: Demanda mensual.

Tabla 7. Determinación de la demanda de agua para un solo baño.

MES	PRECIPITACION (mm)	DEMANDA (m ³)
Enero	43,61	32,18
Febrero	44,51	32,18
Marzo	94,09	31,14
Abril	100,73	32,18
Mayo	119,13	31,14
Junio	52,40	32,18
Julio	41,23	32,18
Agosto	32,95	29,06
Septiembre	45,19	32,18
Octubre	98,73	31,14
Noviembre	109,34	32,18
Diciembre	74,74	31,14

Fuente: Autor

5.4 Determinación de oferta y demanda para todo el techo del edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

- Área total del techo del edificio I: 2.822 m²
- El edificio I cuenta con seis baterías de baños; según el estudio anterior, a cada una de estas ingresan 200 usuarios por día, para los seis baños entrarán en promedio: 1200 usuarios.

A continuación se presenta la oferta de agua para el total del techo el edificio I.

Tabla 8. Oferta de agua para el total del techo del edificio I.

MES	PRECIPITACION (mm)	ABASTECIMIENTO (m ³)	ABASTECIMIENTO (m ³)
		PARCIAL	ACUMULADO
Enero	43,61	92,3	92,3
Febrero	44,51	94,2	186,5
Marzo	94,09	199,1	385,6
Abril	100,73	213,2	598,8
Mayo	119,13	252,1	851,0
Junio	52,40	110,9	961,9
Julio	41,23	87,3	1049,1
Agosto	32,95	69,7	1118,9
Septiembre	45,19	95,6	1214,5
Octubre	98,73	209,0	1423,5
Noviembre	109,34	231,4	1654,9
Diciembre	74,74	158,2	1813,1

Fuente: Autor

El área total del techo del edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería brinda un abastecimiento máximo de 252 m³ correspondientes al mes de mayo.

Ahora se determina la dotación diaria:

$$\frac{(1813 \text{ m}^3 - 1 \text{ m}^3) * \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right)}{365 \text{ días} * 1200 \text{ usuarios}} = 4,14 \frac{\text{L}}{\text{usuario} * \text{día}}$$

Ahora se determina la demanda:

Tabla 9. Determinación de la demanda de agua para seis baterías de baños.

MES	PRECIPITACION (mm)	DEMANDA (m ³)	DEMANDA (m ³)
			ACUMULADO
Enero	43,61	154,0	154,0
Febrero	44,51	154,0	308,0
Marzo	94,09	149,0	457,1
Abril	100,73	154,0	611,1
Mayo	119,13	149,0	760,1
Junio	52,40	154,0	914,1
Julio	41,23	154,0	1068,1
Agosto	32,95	139,1	1207,2
Septiembre	45,19	154,0	1361,2
Octubre	98,73	149,0	1510,3
Noviembre	109,34	154,0	1664,3
Diciembre	74,74	149,0	1813,3

Fuente: Autor

Con los datos obtenidos en el abastecimiento y la demanda de agua, podemos determinar cuánto de la demanda se podría suplir con el agua recolectada del techo del edificio I. Tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10. Porcentaje de agua que se puede suplir.

MES	ABASTECIMIENTO (m ³)	DEMANDA (m ³)	% de agua que se puede suplir
	ACUMULADO	ACUMULADO	
Enero	92,3	154,0	60%
Febrero	186,5	308,0	61%
Marzo	385,6	457,1	84%
Abril	598,8	611,1	98%
Mayo	851,0	760,1	112%
Junio	961,9	914,1	105%
Julio	1049,1	1068,1	98%
Agosto	1118,9	1207,2	93%
Septiembre	1214,5	1361,2	89%
Octubre	1423,5	1510,3	94%
Noviembre	1654,9	1664,3	99%
Diciembre	1813,1	1813,3	100%

Fuente: Autor

6 Resultados

6.1 Técnicas para la recolección de información

Para la recolección de información se contó con los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio las cuales arrojaron las condiciones del agua tanto a su llegada como a la salida del filtro. Los datos se tabularon para posteriormente hacer la comparación de los medios filtrantes y conocer qué filtro tiene una mayor eficiencia de remoción de partículas contaminantes.

Además de los niveles pluviométricos y cálculos de oferta hídrica obtenidos gracias a datos suministrados por la estación meteorológica ubicada en las instalaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se obtuvo la capacidad óptima de recolección con base en las dimensiones de la superficie de recolección del techo del Edificio I.

6.2 Características fisicoquímicas del agua de escorrentía almacenada y del agua tratada.

Se analizaron las características fisicoquímicas: pH, temperatura, turbidez, color, conductividad, SST, DQO, DBO y nitratos, del agua de escorrentía de techo almacenada, y luego durante 12 días se tomaron muestras cada dos días para analizar los mismos parámetros en el agua filtrada.

Un primer periodo de prueba de los filtros se realizó entre el 19 de noviembre y el 30 de noviembre de 2018.

Una vez se realizaron los análisis de las muestras de agua filtrada en ambos filtros se evaluó el funcionamiento de los mismos en el periodo de tiempo estipulado (12 días) y se determinó realizarles un retrolavado para ponerlos a operar nuevamente y realizar un nuevo muestreo.

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 11 y 12:

Tabla 11. Resultados primer periodo de prueba para agua filtrada a través de cascarilla de arroz.

Nombre	Fecha	DQO (mgO ₂ /L)	DBO (mg/L)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Nitratos (mg/L N-NO ₃)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Agua lluvia	19-nov-18	23,76	1,19	7,60	0,00	8,76	18,10	25,90	6,44	0,45	180,00
Cascarilla de Arroz	21-nov-18	71,29	13,37	160,00	12,60	7,89	18,40	102,60	5,79	0,69	4,00
	23-nov-18	102,97	18,00	238,00	13,40	6,47	18,50	256,00	3,64	1,20	4,00
	24-nov-18	47,52	35,64	120,00	3,60	8,53	19,20	98,60	4,60	1,02	30,00
	26-nov-18	31,68	94,50	14,00	0,20	8,32	18,20	29,10	2,35	1,32	20,00
	28-nov-18	95,05	85,50	160,00	11,90	7,16	17,90	80,30	6,46	0,81	16,00
	30-nov-18	79,21	39,00	144,00	6,00	7,62	17,90	90,00	6,85	0,87	64,00

Fuente: Autor

Tabla 12. Resultados primer periodo de prueba para agua filtrada a través de luffa.

Nombre	Fecha	DQO (mgO ₂ /L)	DBO (mg/L)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Nitratos (mg/L N-NO ₃)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Agua lluvia	19-nov-18	23,76	1,19	7,60	0,00	8,76	18,10	25,90	6,44	0,45	180,00
Luffa	21-nov-18	55,45	1,78	15,00	0,30	8,41	18,30	34,80	6,67	0,48	40,00
	23-nov-18	47,52	12,00	30,00	1,10	6,57	18,40	91,80	6,18	0,84	4,00
	24-nov-18	31,68	89,11	13,00	0,00	8,92	18,60	32,80	6,33	0,35	62,00
	26-nov-18	63,37	94,50	7,20	0,00	9,08	18,60	19,02	6,42	0,21	22,00
	28-nov-18	47,52	0,60	23,00	2,00	7,78	20,30	72,72	6,75	0,41	48,00
	30-nov-18	31,68	19,80	28,00	1,40	7,31	17,70	56,90	6,96	0,81	2,00

Fuente: Autor

Se puede observar que, con excepción de los sólidos suspendidos totales, todos los parámetros se incrementan en el efluente de ambos filtros siendo el más relevante el aumento en la DQO. A raíz de estos resultados se decidió lavar los filtros a contraflujo para iniciar un nuevo período de filtración. En las tablas 13 y 14 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 13. Resultados segundo periodo de prueba para agua filtrada a través de cascarilla de arroz.

Nombre	Fecha	DQO (mgO ₂ /L)	DBO (mg/L)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Nitratos (mg/L N-NO ₃)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Agua lluvia	18-ene-19	42,28	11,41	61,00	6,00	8,76	18,10	96,80	6,44	0,45	92,00
Cascarilla de Arroz	18-ene-19	38,83	9,40	59,00	4,50	6,80	18,40	76,40	5,79	0,69	58,00
	21-ene-19	29,51	9,81	36,00	1,40	7,10	18,50	75,30	3,64	1,20	52,00
	23-ene-19	31,07	9,92	24,00	1,60	6,96	19,20	68,10	4,60	1,02	30,00
	25-ene-19	18,64	9,12	31,00	1,20	6,73	18,20	67,40	2,35	1,32	30,00
	28-ene-19	29,51	9,75	40,00	1,20	6,73	17,90	66,20	6,46	0,81	28,00
	30-ene-19	18,64	10,10	18,20	0,50	6,39	17,90	52,80	6,85	0,87	8,00

Fuente: Autor

Tabla 14. Resultados segundo periodo de prueba para agua filtrada a través de luffa.

Nombre	Fecha	DQO (mgO ₂ /L)	DBO (mg/L)	Color (UPC)	Turbiedad (NTU)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Nitratos (mg/L N-NO ₃)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Agua lluvia	18-ene-19	42,28	11,41	61,00	6,00	8,76	18,10	96,80	6,44	0,45	92,00
Luffa	18-ene-19	34,17	8,82	50,00	5,60	7,41	18,30	85,50	6,67	0,48	66,00
	21-ene-19	32,62	9,23	40,00	1,30	7,16	18,40	85,00	6,18	0,54	64,00
	23-ene-19	29,51	9,35	38,00	1,70	7,19	18,60	82,10	6,33	0,35	34,00
	25-ene-19	17,09	9,69	28,00	1,00	6,79	18,60	78,00	6,42	0,21	32,00
	28-ene-19	23,30	10,33	31,00	1,70	6,84	19,30	68,30	6,75	0,41	22,00
	30-ene-19	13,98	10,10	17,00	0,60	6,65	17,70	54,70	6,96	0,60	12,00

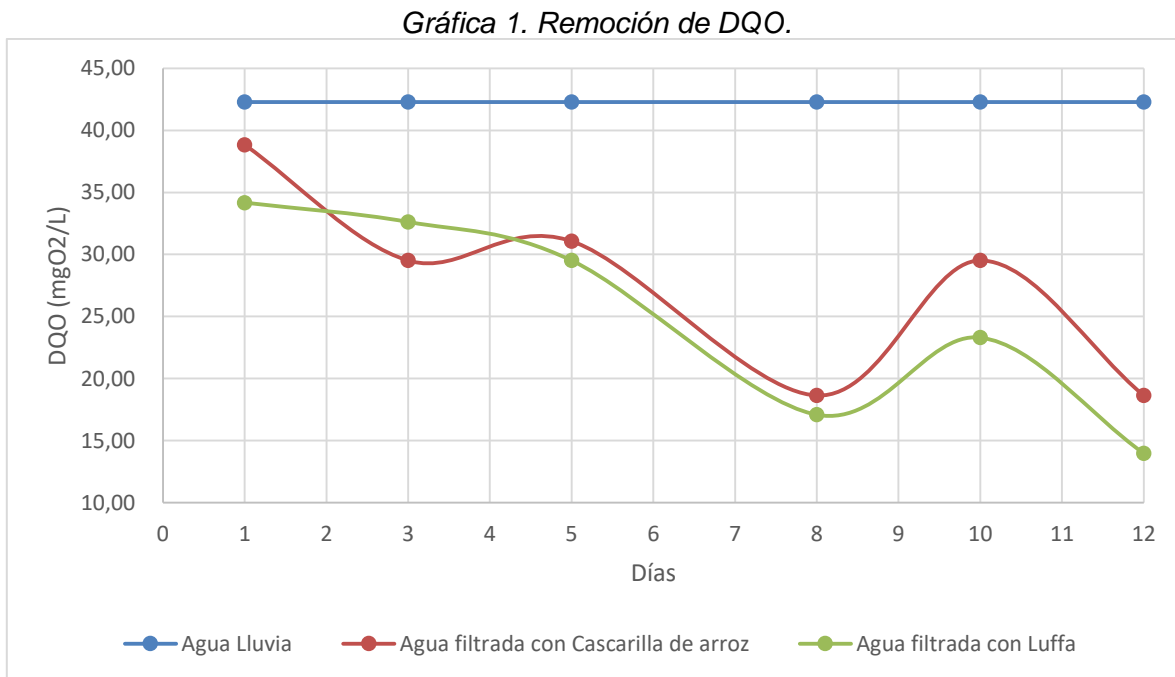
Fuente: Autor

Luego de realizar un retro lavado a los filtros, en el segundo periodo de prueba, se puede apreciar que los lechos filtrantes tuvieron remociones en todos sus parámetros, esto indica que posiblemente los lechos estaban colmatados o que no tuvieron un adecuado lavado cuando se construyeron los filtros.

7 Análisis de resultados

7.1 Demanda Química de Oxígeno -DQO

Para el agua lluvia almacenada, antes de filtración, la DQO se encuentra en 42,3 mg/L. Luego de pasar por los filtros se obtuvo desde el primer día una disminución de la misma llegando a valores de 18,6 mg/L y 14,0 mg/L para la cascarilla y la luffa respectivamente después de los doce días. Se obtuvieron remociones de 55,9 % para el filtro de cascarilla de arroz y 66,9 % para el de luffa. En el filtro de cascarilla de arroz se evidencia un aumento entre los días 8 y 10, posiblemente debido a velocidades más altas de filtración y aumento de carga orgánica. Esto se observa en la Gráfica 1. Remoción de DQO.

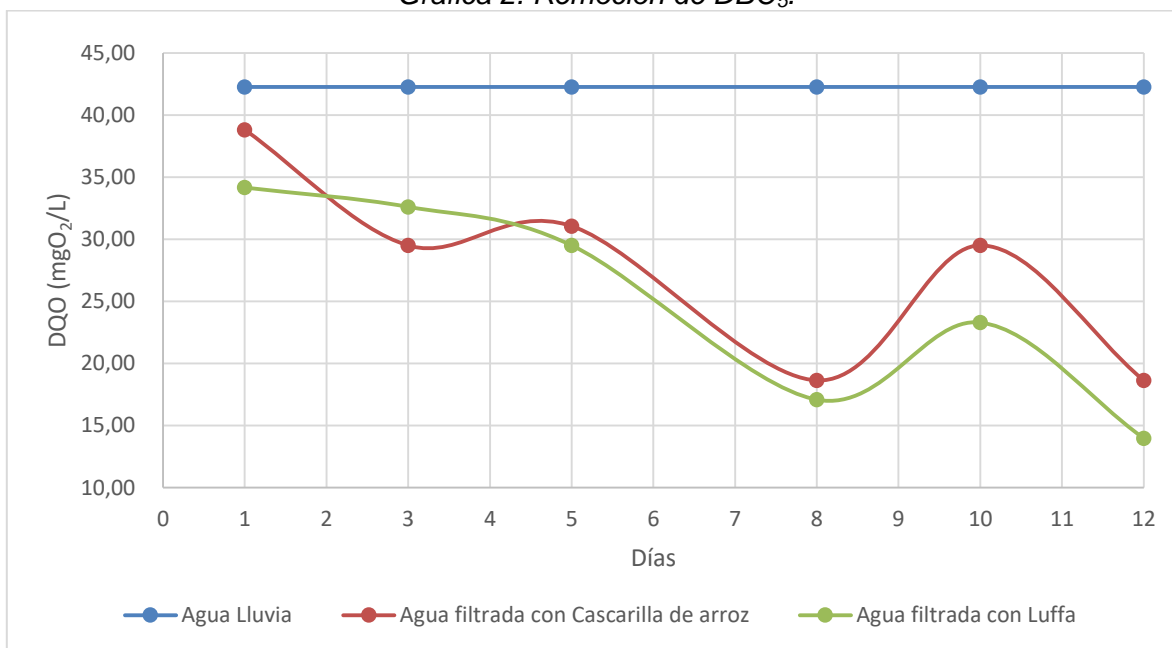


Fuente: Autor

7.2 Demanda Biológica de Oxígeno-DBO

La DBO₅ del agua lluvia almacenada fue de 11,4 mg/L. Una vez filtrada se obtuvieron valores mínimos de 9,4 mg/L para el filtro de cascarilla de arroz y 8,8 mg/L para el de luffa. La remoción de este parámetro en los filtros fue de 20,1 % en la cascarilla de arroz y 22,6 % en la luffa, tal como se observa en la Gráfica 2. Remoción de DBO₅.

Gráfica 2. Remoción de DBO₅.

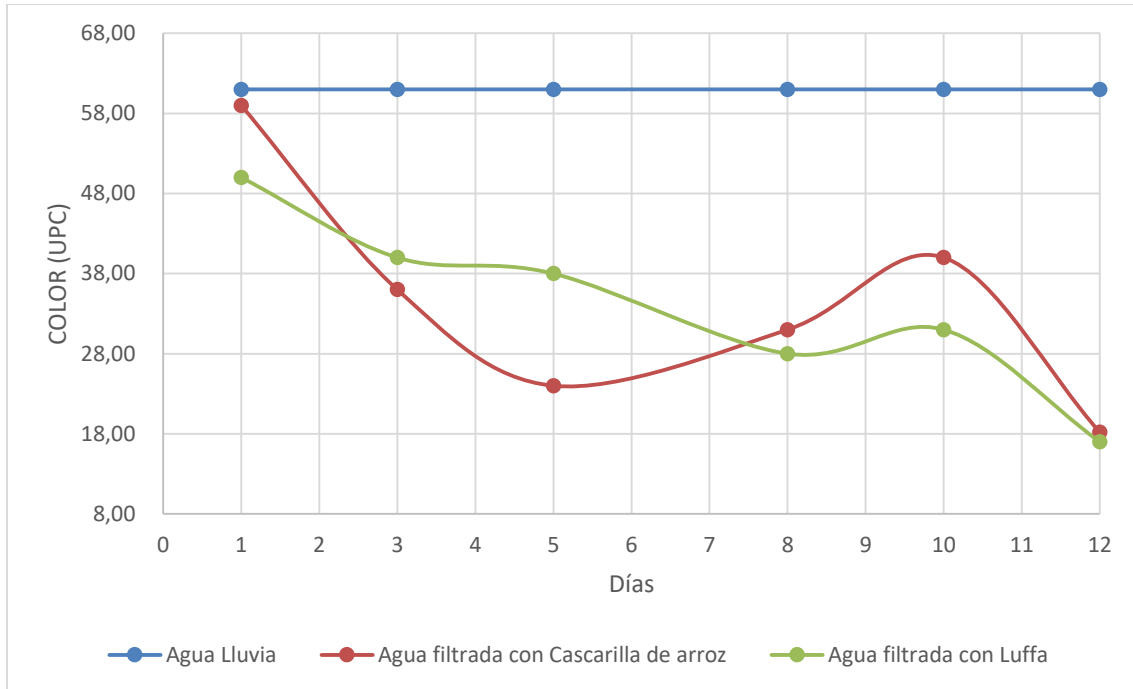


Fuente: Autor

7.3 Color

El color dio como resultado 61 UPC para el agua lluvia sin filtrar. En ambos filtros se presentó una disminución del color, aunque se evidenció en el filtro de cascarilla de arroz un incremento entre los días 5 y 10. Los resultados se observan en la Gráfica 3. Remoción de Color.

Gráfica 3. Remoción de Color.

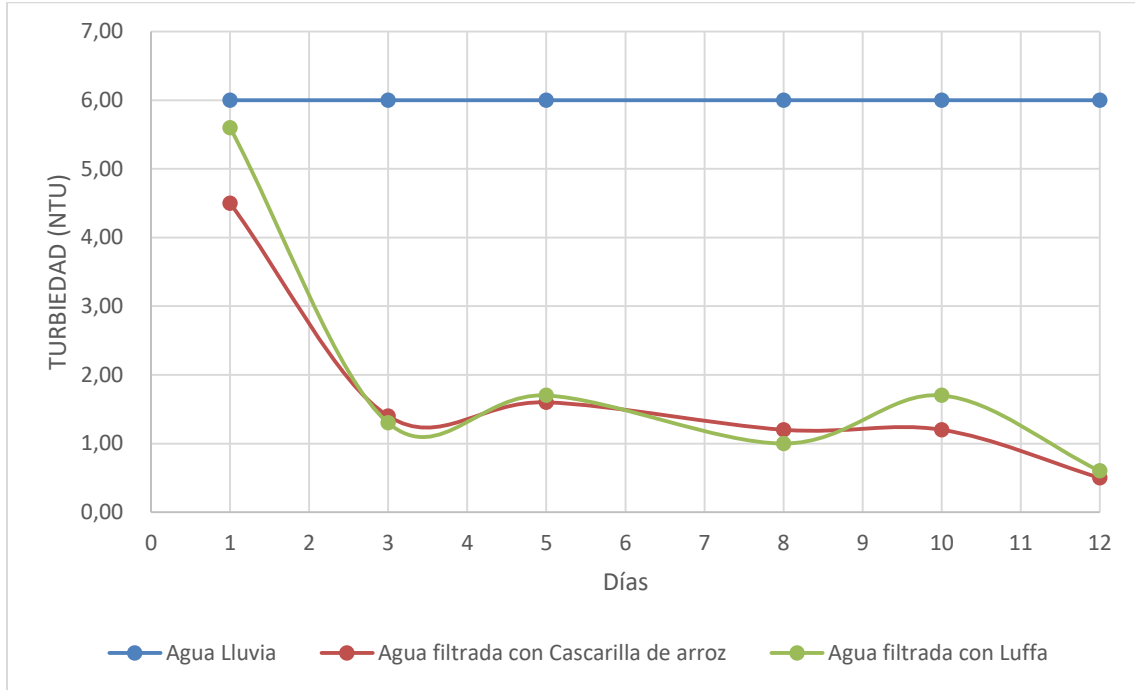


Fuente: Autor

7.4 Turbiedad

Al realizar la determinación de la turbiedad al agua almacenada antes de su paso por los lechos filtrantes, se obtuvo un resultado de 6 NTU, y al efectuar la valoración diaria para cada filtro se presentaron niveles bajos, con tendencia a disminuir, lo que indica que a través del tiempo los filtros van reteniendo más partículas en suspensión. El porcentaje de remoción para este parámetro fue de 91,7 % en la cascarilla de arroz y 90,0 % en la luffa.

Gráfica 4. Remoción de Turbiedad

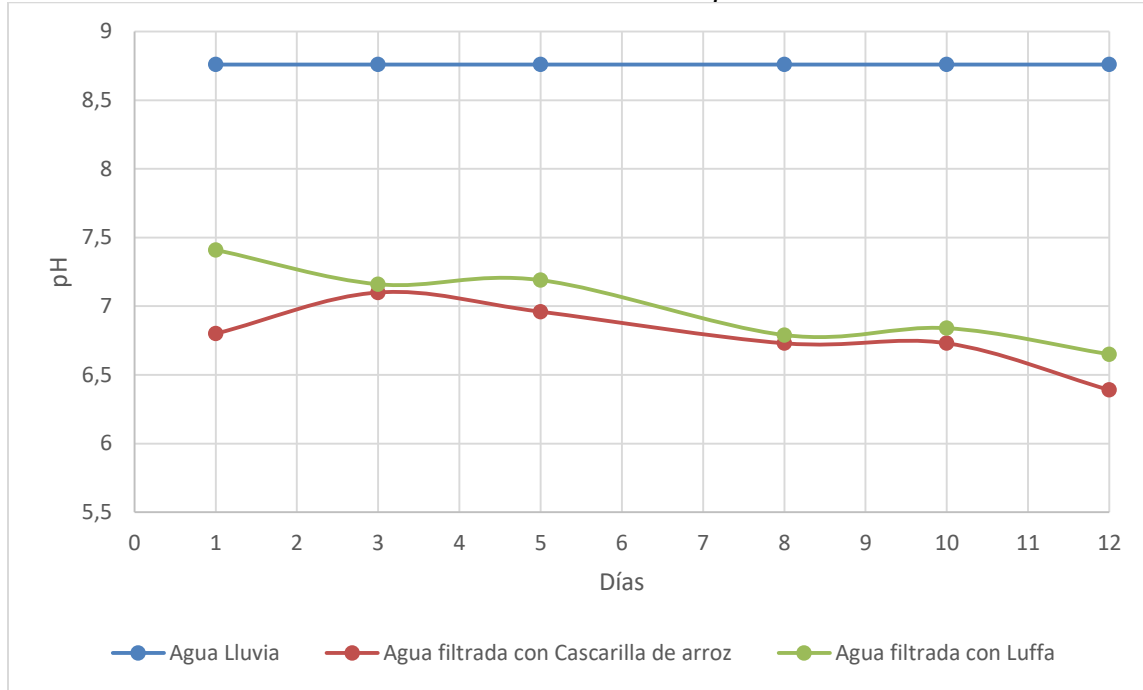


Fuente: Autor

7.5 pH

El pH para los dos filtros no varió significativamente. Para el filtro de cascarilla de arroz se inició con un pH de 6,8 y se terminó con un pH de 6,39; para el filtro de luffa se inició con un pH de 7,41 y se terminó con un pH de 6,65. El valor del agua lluvia almacenada antes de filtrar fue de 8,70. En el caso del pH, el material filtrante posiblemente le aporta al agua compuestos ácidos, ya que el pH para ambos filtros, presentó una tendencia a disminuir.

Gráfica 5. Variación del pH.

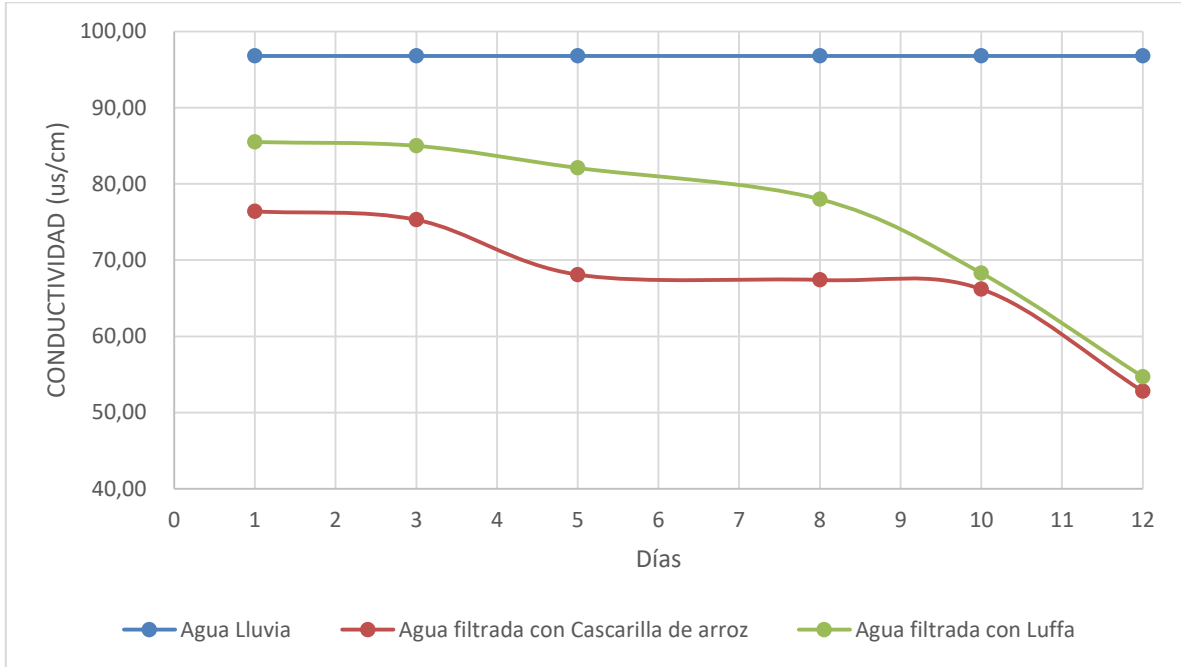


Fuente: Autor

7.6 Conductividad

La conductividad del agua lluvia antes de filtrar fue de $96,8 \mu\text{S}/\text{cm}$; luego del paso por las columnas filtrantes se evidenció una disminución de conductividad, obteniéndose al final del período de estudio un valor de $52,8 \mu\text{S}/\text{cm}$ para el filtro con cascarilla de arroz y $54,7 \mu\text{S}/\text{cm}$ para el filtro de luffa. Posiblemente la disminución en los valores de conductividad se asocia a una disminución en los sólidos disueltos.

Gráfica 6. Variación de la Conductividad.

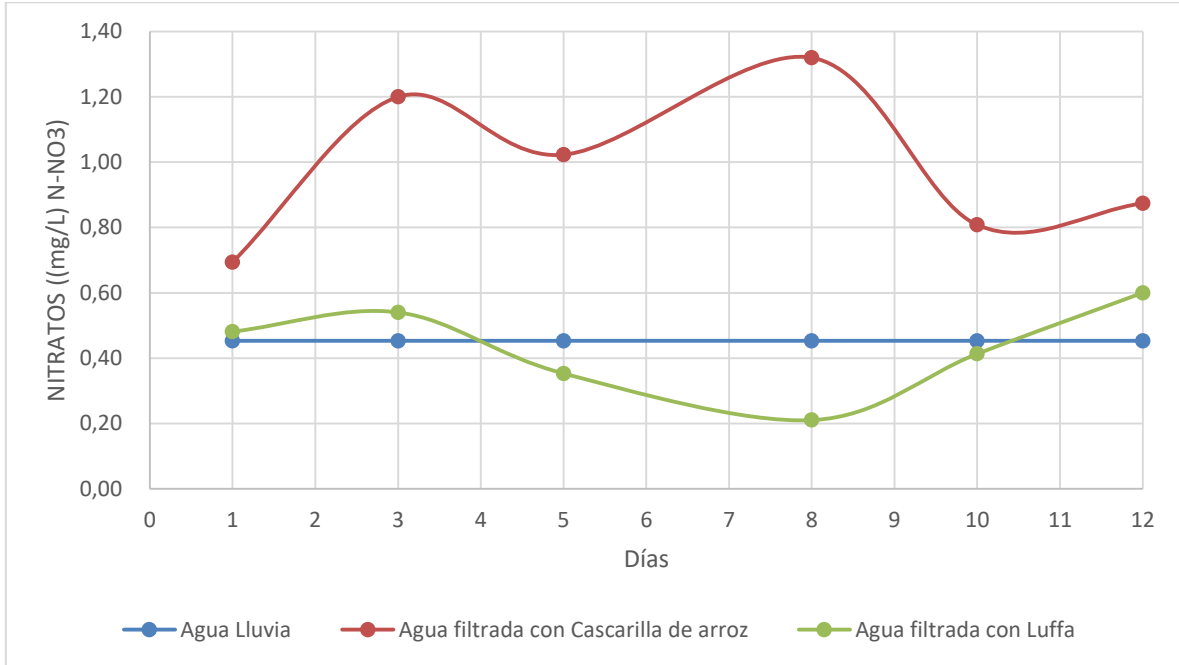


Fuente: Autor

7.7 Nitratos

Este parámetro se analizó para saber si las fumigaciones y fertilizantes que recibe el arroz tienen algún efecto en la cascarilla, y si posteriormente alteraría el agua lluvia filtrada. Con este análisis se pudo comprobar un aumento en el efluente del filtro de cascarilla de arroz, ya que el agua lluvia almacenada dio resultados de 0,45 mg/L N, y el agua filtrada mostró resultados que oscilan entre 0,69 y 1,20 mg/L N-NO₃, mientras que, para el filtro con lecho de luffa los niveles de nitratos oscilaron entre 0,21 y 0,60 mg/L N. Posiblemente estos resultados se deban a las cargas de nitrógeno con las que son fertilizados los cultivos de arroz.

Gráfica 7. Variación del contenido de Nitratos.

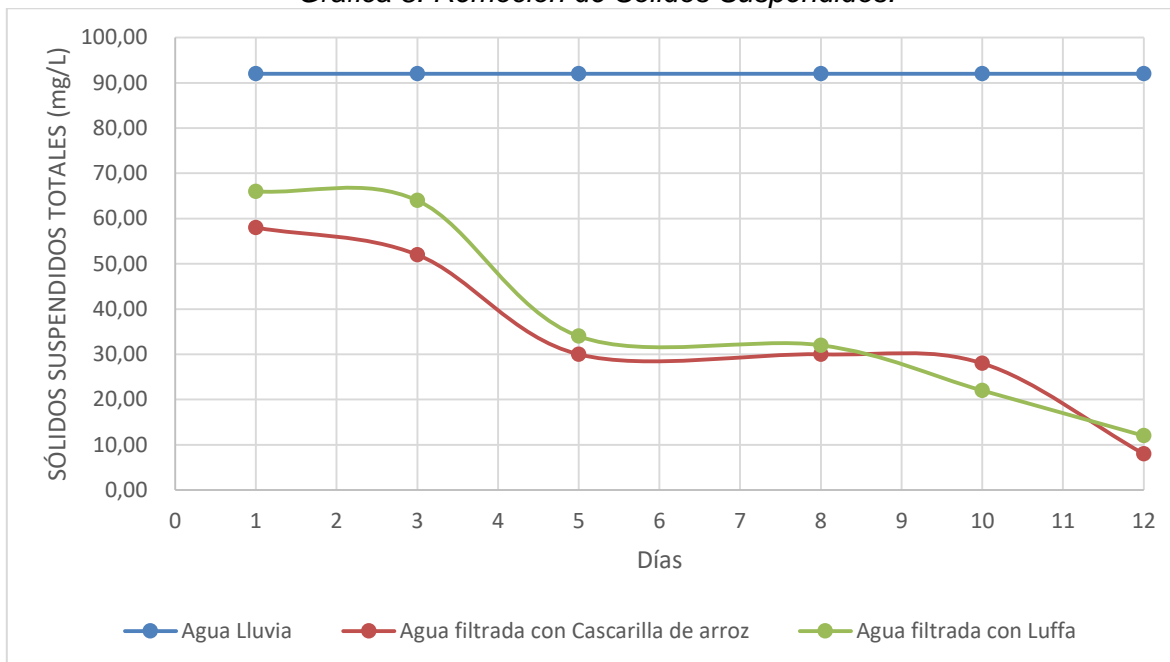


Fuente: Autor

7.8 Sólidos Suspendidos Totales

Para el agua lluvia almacenada se determinó un valor de 92 mg/L de sólidos suspendidos. Luego de la filtración se observó una tendencia decreciente en el efluente de ambos filtros. Para el de cascarilla de arroz, el resultado final fue de 8 mg/L mientras que en el de luffa fue de 12 mg /L. Las remociones para este parámetro fueron de 91,3 % para la cascarilla de arroz y 87 % para la luffa.

Gráfica 8. Remoción de Sólidos Suspendedos.



Fuente: Autor

7.9 Análisis de los lechos filtrantes

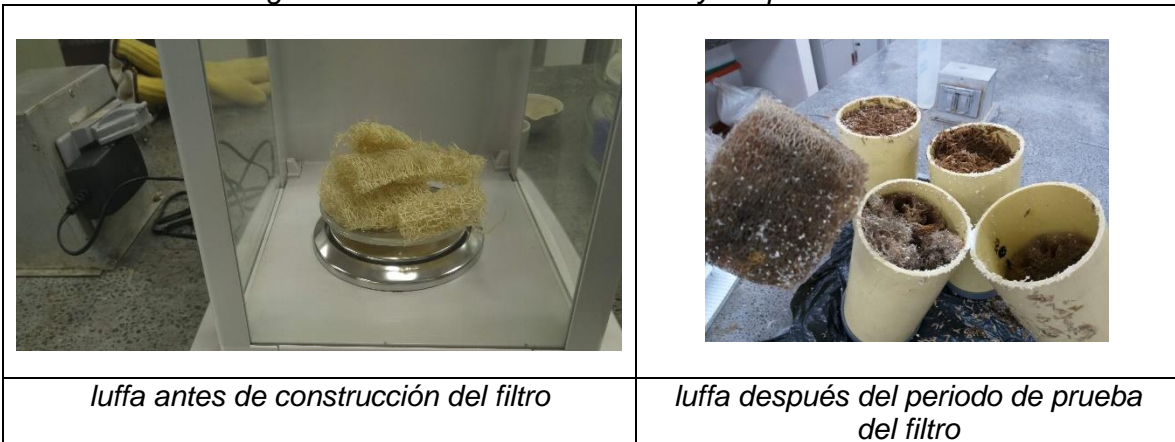
Al terminar la evaluación de los filtros, se realizó un corte por la mitad de cada columna para conocer el estado en el que se encontraba el material filtrante. En la cascarilla de arroz se observó que el color pasó de su amarillo característico a café oscuro, y en la luffa se apreció un color negro parecido al moho del pan, además de un fuerte olor a descomposición, en cuanto a la estructura filtrante se observó una compactación del material tanto en la cascarilla de arroz como en la luffa, tal como se aprecia en las fotografías 5 y 6.

Fotografía 5. Estado de cascarilla de arroz antes y después de su uso.



Fuente: Autor

Fotografía 6. Estado de la luffa antes y después de su uso.



Fuente: Autor

Al material de ambos lechos filtrantes se le determinó el contenido de sólidos volátiles antes y después de su uso para observar el comportamiento del contenido orgánico. En las tablas 15 y 16, se puede observar que, una vez se terminó el periodo de prueba del lecho filtrante, en el lecho de cascarilla de arroz se presentó un aumento apreciable en el porcentaje de volátiles, lo que indica que posiblemente no hay degradación del material y en cambio se puede estar reteniendo material orgánico presente en el agua lluvia. Desafortunadamente

no se cuenta con datos de porcentaje de volátiles del agua lluvia cruda para corroborar esta apreciación. En el caso de la luffa, el porcentaje de volátiles es muy semejante, lo cual sugiere que el aspecto y olor finales de este material puede deberse a la presencia de microorganismos más que a la descomposición propia del mismo.

Tabla 15. Sólidos Volátiles antes del proceso de filtración.

Muestra	Cascarilla de Arroz	Luffa
Sólidos totales, g/100g	34,9	27,0
Sólidos totales volátiles, g/100g	20,3	22,4
Porcentaje volátiles, g/100g	58,1 %	83,1 %

Fuente: Autor

Tabla 16. Sólidos Volátiles después del proceso de filtración.

Muestra	Cascarilla de Arroz	Luffa
Sólidos totales, g/100g	55,1	33,2
Sólidos totales volátiles, g/100g	39,0	29,5
Porcentaje volátiles, g/100g	70,8 %	88,7 %

Fuente: Autor

7.9.1 Calidad del efluente

De los resultados obtenidos a partir de los análisis realizados sobre el agua filtrada (Tablas 13 y 14), se pudo apreciar que la turbiedad, el pH, la conductividad y los nitratos se encuentran por debajo del valor permitido en la Resolución 2115 del 2007, lo cual indica que para estos parámetros se cumple con el objetivo de tratamiento para su posterior aprovechamiento. Los resultados obtenidos en color resultan superiores a los establecidos en la Resolución por lo cual se requeriría algún proceso adicional para cumplir con este parámetro. En cuanto a la DQO, la DBO y los sólidos suspendidos la norma no contempla valores. Los valores de DQO y DBO indican la presencia de materia orgánica lo cual implica que el agua no es para consumo humano. Sin embargo, son valores bajos que indican contaminación leve. Por lo anterior, se puede concluir que el agua filtrada en ambos casos se puede usar para jardinería, lavado de fachadas, descarga de sanitarios, etc., tal como se muestra en la Tabla 17. Comparación de resultados de agua filtrada con la Resolución 2115 del 2007.

Tabla 17. Comparación de resultados de agua filtrada con la Resolución 2115 del 2007.

Comparación resultados frente a la Resolución 2115 del 2007						
Filtros para agua lluvia						
Parámetro	Unidad	Valor máximo permisible	Filtro Cascarilla de arroz	Filtro de Luffa	Cumple	Observación
DQO	mgO ₂ /L	-	18,6	14,0	--	Estos parámetros no se encuentran con valores permisibles dentro de la norma.
DBO	mgO ₂ /L	-	9,1	8,8	--	Estos parámetros no se encuentran con valores permisibles dentro de la norma.
Color	UPC	15	18,2	17,0	No	El color, tal como se puede observar no cumple con la normatividad, lo que nos indica que los lechos filtrantes le aportan unidades de color al agua lluvia.
Turbiedad	UNT	2	0,5	0,6	Si	Este parámetro se encuentra por debajo de la determinación máxima permitida por la normativa, con 1,5 UNT por debajo del nivel admisible.
pH	Unidad	6,5 - 9,0	7,0	7,2	Si	El pH, aparte de tener un comportamiento variante se estableció dentro del rango aceptable, lo que indica que cumple con la norma.
Conductividad	µs/cm	1000	68,1	54,7	Si	La conductividad se encuentra dentro del rango establecido como admisible dentro de la norma, con un valor de 68,1 µs/cm
Nitratos	mg/L N-NO ₃	10	1,3	0,2	Si	En cuanto al nivel de Nitratos, se está cumpliendo con la norma, ya que esta se encuentra por debajo del rango máximo establecido.
Sólidos suspendidos totales	mg/L	-	8,0	12,0	--	Estos parámetros no se encuentran con valores permisibles dentro de la norma.

Fuente: Autor

8 CONCLUSIONES

- Al evaluar los resultados fisicoquímicos se encontró que los filtros estudiados lograron una remoción de 60 % de DQO, 21 % de DBO, 71 % de color; 91 % de turbiedad y 89 % de sólidos suspendidos totales. En cuanto a los nitratos, para el filtro de cascarilla de arroz se presentó un aumento, lo cual indica que el lecho filtrante aporta nitratos al agua. Aunque se observa una buena remoción de los contaminantes, esta agua no es apta para el consumo humano.
- Los filtros estudiados demuestran una baja reducción de materia orgánica en el agua lluvia, sin embargo son eficientes removiendo sólidos suspendidos, color y turbiedad. Aunque el agua no sea potable, se puede utilizar para otros fines tales como riego de jardines, lavado de zonas duras o fachadas y hasta emplearse en la descarga de sanitarios con una adecuación en las instalaciones hidráulicas.
- Los resultados desfavorables obtenidos en el primer periodo de prueba pudieron deberse a impurezas presentes en el medio filtrante, que después del primer periodo de muestreo y el retro lavado que se realizó, todas las impurezas fueron removidas. Esto sugiere una preparación más rigurosa del medio filtrante antes de usarlo.
- También es posible que el primer período de filtración haya actuado como proceso de curado, y que el posterior lavado del lecho filtrante haya permitido una mayor eficiencia del proceso de filtración.
- La cascarilla de arroz y la luffa como lechos filtrantes tienen una corta vida útil por su tendencia a acumular microorganismos y material orgánico que puede descomponerse por lo cual se hace necesario su reemplazo periódico. Sin embargo, hace falta realizar más análisis al material o estudiar la posibilidad de retro lavados periódicos.

9 RECOMENDACIONES

- Se pueden realizar estudios con mayor variedad de lechos filtrantes a partir de materiales vegetales inertes que provengan de algún proceso comercial o industrial.
- Es deseable ensayar diferentes velocidades de filtración para analizar su incidencia en la remoción de contaminantes. Además, se puede variar la profundidad del medio filtrante, para establecer valores mínimos que permitan obtener mayores eficiencias en los filtros.
- Hace falta realizar estudios con tiempos de operación mayores, para determinar el comportamiento de los materiales filtrantes.
- Es deseable realizar un montaje que permita la recolección y flujo continuo de las aguas lluvias para establecer el efecto de la variación de las características del afluente.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Rim-Rukeh, A., Awatafete, J., & Okoyoko, A. (2007). Treatment of harvested Rainwater in a pilot scale fixed- bed filled with bone char. *Journal of Applied of sciences Research*, 690-694.
(Pachpute, Tumbo, & Sally, 2009) (Ambiente, 2001)
- M. S. Yineth y A. S. Maira diagnóstico de la situación actual del recurso hídrico en la universidad Libre sede Bosque Popular, Proyecto De Grado, Universidad Libre Facultad De Ingeniería, Bogotá-2009 número del proyecto 803964.
- LARA, Jaime et al. Aprovechamiento del agua lluvia para riego y lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá). En: *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)*. Julio-diciembre de 2007, vol. 11 no. 2, p. 193-202
- Buitrago, N. (2011). Cuantificación y caracterización de la calidad de agua de escorrentía de techo para el prediseño de una piscina de retención en el campus de la universidad nacional de Colombia (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- ROSA CHÁVEZ, francisco ingeniería y medio ambiente universidad don bosco facultad de ingeniería departamento de mecánica, aguas lluvias y química del agua. Internet:(<http://www.elsalvadoronline.com/ecologia/agua/h2o/aguas%20lluvias/pagina4.html> , agosto 2010)
- Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Unidad de apoyo técnico en saneamiento básico rural (UNATSABAR). Guía de diseño para captación del agua de lluvia. Lima. Enero 2001. Pdf
- P.M. Margarita Avances en la gestión integral del agua lluvia contribuciones al consume sostenible del agua, el caso de "lluvia" en México, revista internacional sostenibilidad, tecnología y humanismo Año 2008 pág. 43,46,50
- Ballén J.A., Galarza M. A., Ortiz R.O., Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia en Colombia, seminario Iberoamericano sobre sistemas de abastecimiento urbano de agua 7 junio de 2006.
- Pachpute, J., Tumbo, S., & Sally, H. (2009). Sustainability of rainwater harvesting systems in rural catchment of sub-saharan Africa. *Water Resour Manage*, 2815-2839.

- S. I. Efe Quality of rainwater harvesting for rural communities of Delta State, Nigeria. En: Environmentalist. 2006, vol. 26, p. 175-181
- LOUISE, Impey Rain's free and worth collecting. En: Farmers Weekly. Mar 27, 2009. vol. 150 no. 13 p. 12-13
- DAVIS, John C Harvesting Rain En: the Environmental Magazine. Jul/Aug 2009. Vol. 20 no. 4, p. 34-35
- REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO, RAS 2000. Sistema de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Bogotá DC, Noviembre de 2000.
- PEREZ CARMONA, Rafael. Instalaciones hidráulicas, sanitarias y de gas en edificaciones. Edición 1997. Bogotá
- Revista Libertas. Internet: (<http://www.biodisol.com/biocombustibles/estudian-los-residuos-lignocelulosicos-considerados-sobrantes-o-subproductos-de-bajo-valor-agregado-para-la-obtencion-de-energia-energias-renovables-biocombustibles> , agosto 2010)
- ROSA CHÁVEZ, francisco ingeniería y medio ambiente universidad don bosco facultad de ingeniería departamento de mecánica, aguas lluvias y química del agua. Internet: (<http://www.elsalvador-online.com/ecología/agua/h2o/aguas%20lluvias/pagina4.html> , agosto 2010)
- Salame, I., Bandosz, T. Role of surface chemistry in adsorption of phenol on activated carbons. Journal of Colloid and Interface Science 264 (2003) 307-312.
- Koh, M., Nakajima, T. Adsorption of aromatic compounds on C_xN-coated activated carbon. Carbon 38 (2000) 1947-1954.
- Lenore S. Clesceri, WPCF. Arnold E. Greenberg, APHA. R. Rhodes Trussell, AWWA. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 1992. p 4 – 107, 2 – 12, 2 – 88, 2 – 81, 2 – 83, 5 - 17.
- Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Unidad de apoyo técnico en saneamiento básico rural (UNATSABAR). Guía de diseño para captación del agua de lluvia. Lima. Enero 2001. Pdf

- Langmuir, D. (1997): Aqueous environmental. geochemistry. Prentice Hall. Londres, p 600.
- VÁZQUEZ, Ana FERNÁNDEZ, Silvia DELGADO, Jordi FALCÓN, Ismael BARRIENTOS, Víctor JUNCOSA, Ricardo MISSANA, Tiziana DE LOS RÍOS, Úrsula MARTIN, Pedro. Determinación del Punto Isoeléctrico de Residuos de Grano Fino y su Potencial Uso en la Neutralización de Aguas Ácidas. Revista de la sociedad española de mineralogía. Macla nº 9. Septiembre 08.

Anexos

Anexo 1. Resultados del agua lluvia almacenada.

Agua Lluvia						
Parámetros	Días					
	18/01/2019	21/01/2019	23/01/2019	25/01/2019	28/01/2019	30/01/2019
	1	3	5	8	10	12
DQO (mgO ₂ /L)	42,28	42,28	42,28	42,28	42,28	42,28
DBO (mg/L)	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41
Color (UPC)	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00
Turbiedad (NTU)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
pH	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76
Temperatura (°C)	18,10	18,10	18,10	18,10	18,10	18,10
Conductividad (µs/cm)	96,80	96,80	96,80	96,80	96,80	96,80
Oxígeno disuelto (mg/L)	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44
Nitratos (mg/L N-NO ₃)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	92,00	92,00	92,00	92,00	92,00	92,00

Anexo 2. Resultados del agua lluvia pasada por el filtro de cascarilla de arroz.

Agua filtro Cascarilla de arroz						
Parámetros	Días					
	18/01/2019	21/01/2019	23/01/2019	25/01/2019	28/01/2019	30/01/2019
	1	3	5	8	10	12
DQO (mgO ₂ /L)	38,83	29,51	31,07	18,64	29,51	18,64
DBO (mg/L)	9,40	9,81	9,92	9,12	9,75	10,10
Color (UPC)	59,00	36,00	24,00	31,00	40,00	18,20
Turbiedad (NTU)	4,50	1,40	1,60	1,20	1,20	0,50
pH	6,80	7,10	6,96	6,73	6,73	6,39
Temperatura (°C)	18,40	18,50	19,20	18,20	17,90	17,90
Conductividad (µs/cm)	76,40	75,30	68,10	67,40	66,20	52,80
Oxígeno disuelto (mg/L)	5,79	3,64	4,60	2,35	6,46	6,85
Nitratos (mg/L N-NO ₃)	0,69	1,20	1,02	1,32	0,81	0,87
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	58,00	52,00	30,00	30,00	28,00	8,00

Anexo 3. Resultados del agua lluvia pasada por el filtro de luffa.

Agua filtro luffa						
Parámetros	Días					
	18/01/2019	21/01/2019	23/01/2019	25/01/2019	28/01/2019	30/01/2019
	1	3	5	8	10	12
DQO (mgO ₂ /L)	34,17	32,62	29,51	17,09	23,30	13,98
DBO (mg/L)	8,82	9,23	9,35	9,69	10,33	10,10
Color (UPC)	50,00	40,00	38,00	28,00	31,00	17,00
Turbiedad (NTU)	5,60	1,30	1,70	1,00	1,70	0,60
pH	7,41	7,16	7,19	6,79	6,84	6,65
Temperatura (°C)	18,30	18,40	18,60	18,60	19,30	17,70
Conductividad (µs/cm)	85,50	85,00	82,10	78,00	68,30	54,70
Oxígeno disuelto (mg/L)	6,67	6,18	6,33	6,42	6,75	6,96
Nitratos (mg/L N-NO ₃)	0,48	0,54	0,35	0,21	0,41	0,60
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	66,00	64,00	34,00	32,00	22,00	12,00

Anexo 4. Resultados caudal y carga hidráulica para el filtro de cascarilla de arroz.

Cascarilla de Arroz			
Fecha	Días	Caudal (m ³ /día)	Carga Hidráulica (m ³ /día*m ²)
18-ene-19	1	0,00615	0,758
21-ene-19	3	0,00613	0,7566
23-ene-19	5	0,00613	0,7566
25-ene-19	8	0,00612	0,7549
28-ene-19	10	0,00611	0,7531
30-ene-19	12	0,00611	0,7531

Anexo 5. Resultados caudal y carga hidráulica para el filtro de luffa.

luffa			
Fecha	Días	Caudal (m ³ /día)	Carga Hidráulica (m ³ /día*m ²)
18-ene-19	1	0,00616	0,760
21-ene-19	3	0,00616	0,7602
23-ene-19	5	0,00615	0,7584
25-ene-19	8	0,00613	0,7566
28-ene-19	10	0,00613	0,7566
30-ene-19	12	0,00612	0,7549

Anexo fotográfico

Fotografía 7. Multiparámetro HACH



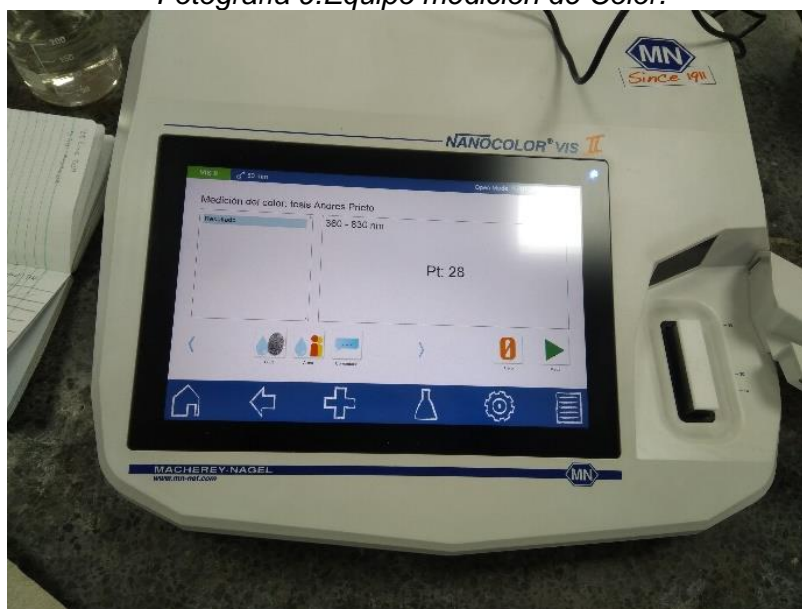
Fuente: Autor

Fotografía 8. Equipo medición de turbiedad.



Fuente: Autor

Fotografía 9. Equipo medición de Color.



Fuente: Autor

Fotografía 10. Equipo medición conductividad.



Fuente: Autor

Fotografía 11. Medición DBO.



Fuente: Autor

Fotografía 12. Procedimiento para medición de Sólidos Suspendidos Totales



Fuente: Autor

Fotografía 13. Equipo empleado en el procedimiento para la determinación de DQO



Fuente: Autor

Fotografía 14. Toma de datos en la determinación de Nitratos



Fuente: Autor